

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Šíření rádiových signálů nad zemským povrchem
Radio Signals Propagation above the Earth's Surface

2015

Lukáš Pavera

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání bakalářské práce

Student: **Lukáš Pavera**
Studijní program: B2647 Informační a komunikační technologie
Studijní obor: 2601R013 Telekomunikační technika
Téma: **Šíření rádiových signálů nad zemským povrchem**
Radio Signals Propagation above the Earth's Surface

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je vytvoření přehledu a srovnání použitelných metod šíření rádiových signálů nad zemským povrchem pro pásmo UHF.

1. Popis teorie šíření rádiových signálů v pásmu UHF.
2. Popis metod šíření v pásmu UHF.
3. Srovnání metod šíření s využitím simulačního softvéru.
4. Rozbor dosažených výstupů.

Seznam doporučené odborné literatury:

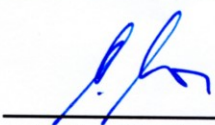
Sizun H.: Radio Wave Propagation for Telecommunication Applications, Springer 2004, ISBN 978-3540-40758-4

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Roman Šebesta, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015


doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 4. května 2015

Handwritten signature of Lukáš Růžička in blue ink.

podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Romanu Šebestovi, Ph.D. za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině za jejich podporu při mém studiu.

Abstrakt

Tato práce se zabývá analýzou modelů šíření v různých prostředích. Porovnává modely šíření v pásmu UHF a následně tyto poznatky implementuje na praktických příkladech. Softwarová simulace je realizována v programu RadioLab. Srovnání těchto modelů pak určuje doporučení pro správné zvolení výpočetního modelu.

Klíčová slova

pokrytí; RadioLab; simulace; srovnání modelů šíření; šíření signálu; UHF;

Abstract

The research deals with the analysis of transmission in various environments. It compares the models of transmission in the UHF ray and implements such findings in practical examples. The software simulation of the above-mentioned models is executed in RadioLab software. The comparison of the models designates recommendations for correct determination of the computational model.

Key words

Coverage; propagation models compare; RadioLab; signal propagation; simulation; UHF;

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
c	m/s	rychlost světla
C_H	konstanta	korekční faktor antény
d	m	dráha
E_r	dB/m	intenzita pole
f	Hz	kmitočet
G	konstanta	zisk izotropního zářiče
h_B	m	výška vysílače
h_S	m	výška stanice
I	A	proud
L	dB	útlum trasy
L_U	dB	ztráta síly signálu
λ	m	vlnová délka
r	m	poloměr
θ_{tca}	stupně	korekční faktor
U	V	napětí

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
CA	Korekční faktor modelů ITU (Clearance angle)
ČRa	České radiokomunikace
ČSN	České technické normy
DVB-T	Digitální televizní vysílání (Digital Video Broadcasting – Terrestrial)
GIS	Geografický informační systém
GPS	Globální polohovací systém (Global Positioning System)
HCM	Harmonizovaná výpočetní metoda (Harmonized calculation method)
IEC	Mezinárodní elektrotechnická komise (International Electrotechnical Commission)
ITU	Mezinárodní telekomunikační komise (International Telecommunication Union)
ITU-R	Radiokomunikační sektor ITU (ITU Radiocommunication Sector)
UHF	Ultra krátké vlny (Ultra High Frequency)
Wi-Fi	Wireles-fidelity

Obsah

Úvod.....	- 1 -
1 Základní popis pásma UHF.....	- 2 -
2 Šíření rádiových signálů.....	- 3 -
2.1 Mechanismy šíření signálů.....	- 3 -
2.2 Fresnelovy zóny	- 4 -
2.3 Zemská atmosféra	- 5 -
2.4 Metody šíření signálů.....	- 6 -
3 Šíření rádiových signálů v pásmu UHF	- 7 -
3.1 Reflektce.....	- 8 -
3.2 Rozptyl	- 10 -
3.3 Refrakce	- 10 -
3.4 Vlnovodný kanál	- 11 -
3.5 Difrakce.....	- 11 -
4 Modelování šíření signálu v pásmu UHF	- 13 -
4.1 Výpočet pokrytí.....	- 13 -
4.2 Modely point-to-area.....	- 14 -
4.2.1 ITU-R P.370	- 15 -
4.2.2 ITU-R P.1546	- 16 -
4.2.3 Okumura-Hata model	- 18 -
4.3 Modely point-to-point	- 20 -
4.3.1 Deygoutova metoda.....	- 20 -
4.3.2 ITU-R P.526	- 21 -
5 Srovnání metod s využitím simulačního softwaru	- 22 -
5.1 Softwarová realizace	- 22 -
5.2 Realizace praktického měření	- 24 -
5.3 Simulace na vysílači Hošťálkovice	- 24 -
5.4 Prostředí s vysokou mírou urbanizace.....	- 27 -
5.5 Horské prostředí	- 31 -
6 Rozbor dosažených výsledků	- 34 -

Závěr	- 36 -
Seznam použité literatury	- 37 -
Seznam příloh.....	- 39 -

Úvod

V dnešní době moderních přístrojů a pokročilých technologií je možnost modelovat sítě velice důležitou součástí návrhu rádiového spoje. Schopnost předem danou síť vymodelovat pomocí simulačního softwaru, velice usnadňuje práci - není potřeba nic složitě počítat ani měřit v terénu.

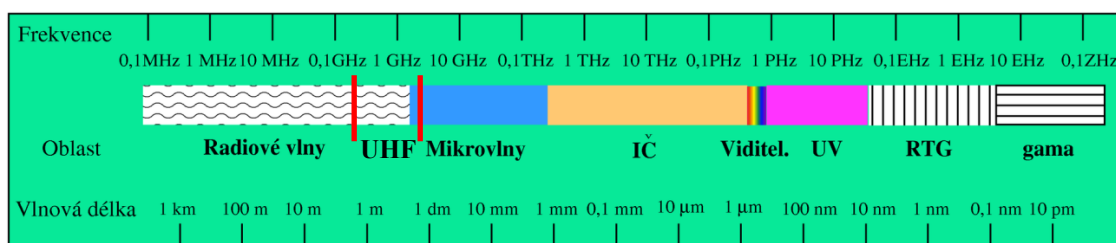
Teoretická část je zaměřena na základní principy šíření rádiových signálů. Jsou zde definovány mechanismy šíření signálů, které mají vliv na přenášený signál v pásmu ultra krátkých vln. Objasňuje základní mechanismy jako je reflexe, refrakce, rozptyl a difrakce.

Praktická část je zaměřena na rozbor modelů šíření pro frekvenční pásmo ultra krátkých vln. Ve škole jsem měl při tvorbě této práce dostupné dva softwary - RadioMobile a RadioLab. RadioMobile bohužel nemá k dispozici výběr samotných modelů šíření, proto jsou v této práci veškeré praktické závěry realizovány v programu RadioLab. S využitím simulačního softwaru jsou postupně v této práci demonstrovány výstupy v podobě map pokrytí ve specifických oblastech a naměřené hodnoty v podobě intenzity elektromagnetického pole.

Výstupem této práce je porovnání použitelnosti dostupných modelů šíření a jejich detailní rozbor. Součástí práce je průzkum prostředí s vysokou mírou urbanizace, hornatého prostředí a simulace reálného vysílače. Veškerá praktická měření jsou lokalizována pro Moravskoslezský kraj, jelikož pro tento kraj jsou k dispozici nejpřesnější mapové podklady.

1 Základní popis pásma UHF

Pásmo UHF (Ultra High Frequency) lze charakterizovat jako rádiové vlny, které ale i svojí částí spadají do pásma mikrovln. Jsou definovány frekvencí v rozsahu od 300 MHz až 3 GHz. V tomto pásmu se vyskytuje například vysílání digitální televize, rádiové služby, GPS (Global Positioning System) i mikrovlnné trouby. Pro své unikátní vlastnosti nám toto pásmo umožňuje komunikaci s objekty umístěnými na oběžné dráze Země. Vlnová délka v tomto pásmu je 1 m při frekvenci 300 MHz a 10 cm pro frekvenci 3GHz. Zařazení Ultra krátkých vln do elektromagnetického spektra je znázorněno na obrázku 1.1.



Obrázek 1.1: *Elektromagnetické spektrum*[10]

V celosvětovém měřítku je frekvenční spektrum mezinárodně koordinováno. Tuto funkci zaujímá Mezinárodní telekomunikační unie ITU (International Telecommunication Union), jejíž hlavním úkolem je efektivně přidělovat kmitočtové spektrum, definuje služby, které lze v přiděleném spektru používat a v neposlední řadě definuje i povolené vysílací výkony [3]. V rámci určitých studijních skupin vydává pravidla a doporučení pro telekomunikace. Z hlediska šíření elektromagnetických vln je klíčová skupina ITU-R (ITU Radiocommunication Sector). Doporučení ITU-R vznikají na základě široké mezinárodní spolupráce, proto jsou mezinárodně uznávána. Samotné dělení rádiových vln viz tabulka 2.1 je určeno Ženevským radiokomunikačním řádem z roku 1990.

Tabulka 1.1: *Označení frekvenčních pásem pro rádiový přenos dle ČSN IEC 60050-713*

Zkratka	ELF	VLF	LF	MF	HF	VHF	UHF	SHF	EHF
Anglický název	Extremely Low Frequency	Very Low Frequency	Low Frequency	Medium Frequency	High Frequency	Very High Frequency	Ultra High Frequency	Super High Frequency	Extremely High Frequency
Český význam	Extremně dlouhé vlny	Velmi dlouhé vlny	Dlouhé vlny	Střední vlny	Krátké vlny	Velmi krátké vlny	Ultra krátké vlny	Centimetrové vlny	Milimetrové vlny
Frekvenční rozsah	3 mHz ÷ 3kHz	3 kHz ÷ 30 kHz	30 kHz ÷ 300 kHz	300 kHz ÷ 3 MHz	3 MHz ÷ 30 MHz	30 MHz ÷ 300 MHz	300 MHz ÷ 3 GHz	3 GHz ÷ 30 GHz	30 GHz ÷ 300 GHz
Vlnová délka	1000 km ÷ 100 km	100 km ÷ 10 km	10 km ÷ 1 km	1 km ÷ 100 m	100 m ÷ 10 m	10 m ÷ 1 m	1 m ÷ 10 cm	10 cm ÷ 1 cm	1 cm ÷ 1 mm

2 Šíření rádiových signálů

2.1 Mechanismy šíření signálů

Způsob šíření rádiových signálů v praxi závisí na jejich vlnové délce. Obecně se pro přenos na delší vzdálenosti používají dlouhé vlny. Šíření těchto vln je stabilní a jejich přenos není doprovázen náhlými změnami intenzity přijímaného signálu a není závislý na sluneční činnosti. V případě vln středních můžeme signál přenášet jak povrchově, tak i prostorově. Pokud se setká v místě příjmu vlna přímá s vlnou odraženou, dochází k interferenci těchto vln a podle fázového posunu se buďto obě vlny sečtou, anebo odečtou. Vlivem velkého útlumu krátkých vln se povrchové vlny šíří pouze do vzdáleností ne větších než několik desítek kilometrů. Krátké vlny se šíří především prostorovými vlnami, které mohou zprostředkovat pomocí odrazů spojení i na značné vzdálenosti. Velmi krátké vlny se zpravidla přenášejí pomocí přímých prostorových vln, nebo vln odražených od země a jiných překážek. Odrazy od ionosféry se téměř nevyskytují. K ohybu těchto vln podél zemského povrchu nedochází, takže jejich dosah je na přímou viditelnost mezi vysílací a přijímací anténou. Kratší vlny se šíří výhradně na přímou viditelnost, jejich útlum lze pozorovat již při mlze a dešti [19].

Elektromagnetické vlny se od vysílače k přijímači mohou šířit několika způsoby:

- 1) **Prostorovou vlnou** – jedná se o základní variantu šíření přímé prostorové vlny mezi dvěma anténami, kdy přímá spojnice mezi anténami není nijak zastíněna. Typickým představitelem aplikace je radioreléový spoj. Tento typ vln můžeme ještě dále rozdělit podle způsobu jejich šíření na několik následujících skupin:

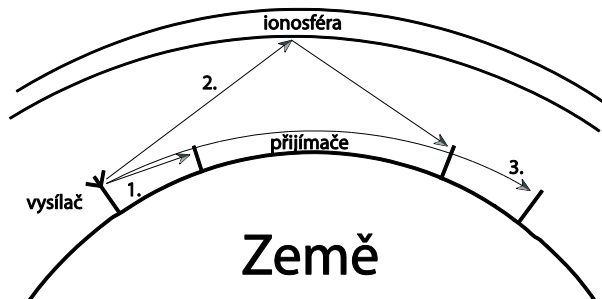
Šíření nad rovinou zemí – v tomto případě se v místě přijímací antény sčítá vlna přímá s vlnou odraženou. Při samotném součtu těchto vln je pak rozhodující fázový rozdíl, který je dán rozdílem obou těchto paprsků. Tento způsob šíření lze využít pouze na krátké vzdálenosti, kdy se neprojevuje zakřivení země [2].

Šíření nad kulovou zemí – tento typ šíření vychází z principů šíření nad rovinou zemí, avšak v tomto případě je využito kalkulací se zakřivením země. Je patrné, že z hlediska praktického využití se tato vlna vyskytuje častěji, než vlna, která se šíří nad rovinou zemí [2].

Šíření nad nerovným terénem – jedná se o v praxi nejčastěji se vyskytující elektromagnetickou vlnu, která se šíří přes nerovný zemský povrch na kterém dochází k odrazu. Zde již nedochází ke klasickému odrazu danému Snellovým zákonem odrazu, ale i k tzv. difúznímu odrazu, kdy se část energie rozptyluje do všech směrů [2].

- 2) **Ionosférickou vlnou** – tato vlna využívá odrazů od ionosféry. Za jistých okolností je tato vrstva schopna odrážet elektromagnetické vlny. Z hlediska přenosů dálkových rádiových signálů je tato vlna klíčová hlavně při přenosu v pásmu krátkých vln, ovlivňuje však i spoje v nižších frekvenčních pásmech [2].
- 3) **Povrchovou vlnou** – šíří se podél rozhraní země – vzduch obdobně jako podél vedení. Pro vznik a následné šíření této vlny je nezbytné, aby zemský povrch vykazoval

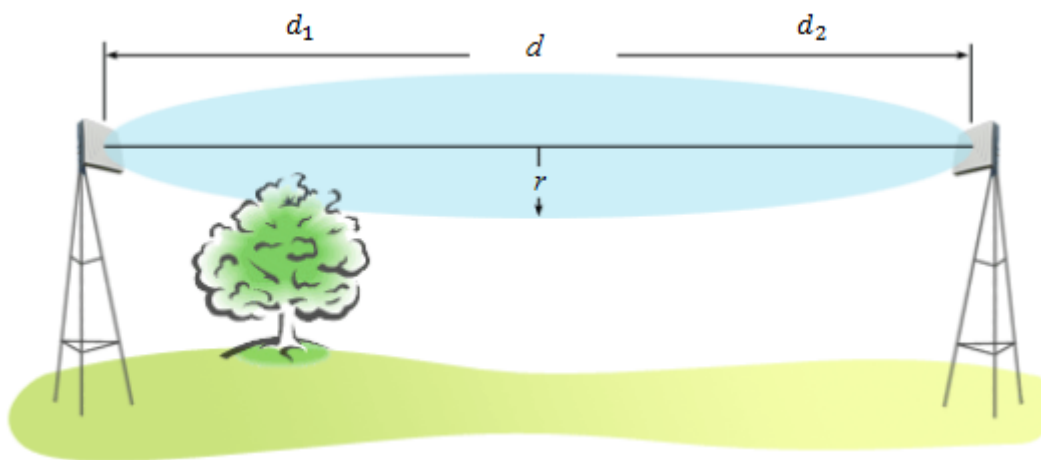
nenulovou vodivost a aby vysílací anténa měla výšku menší než je vlnová délka. Z tohoto důvodu se tyto vlny vyskytují v pásmech s nižšími frekvencemi – řádově v jednotkách MHz [2].



Obrázek 2.1: Princip šíření elektromagnetických vln

2.2 Fresnelovy zóny

Fresnelova zóna je určitý prostor kolem spojnice dvou bodů, a to vysílače a přijímače. Nejširší je Fresnelova zóna uprostřed vzdálenosti mezi anténami. Stínění ve Fresnelově zóně má za následek podstatné snížení síly signálu. Pokud signálu v cestě stojí libovolná překážka generující rušivé odrazy, má za následek snížení kvality přenosu dat a v konečném důsledku i ztrátu rychlosti a zvýšení odezvy v bezdrátové síti [2].



Obrázek 2.2: Fresnelova zóna [11]

Nejmenší přípustnou vzdálenost překážky od přímé spojnice komunikujících zařízení lze určit ze vztahu:

$$r_1 = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d}} \quad (2.1)$$

kde

r_1 je poloměr Fresnelovy zóny [m]

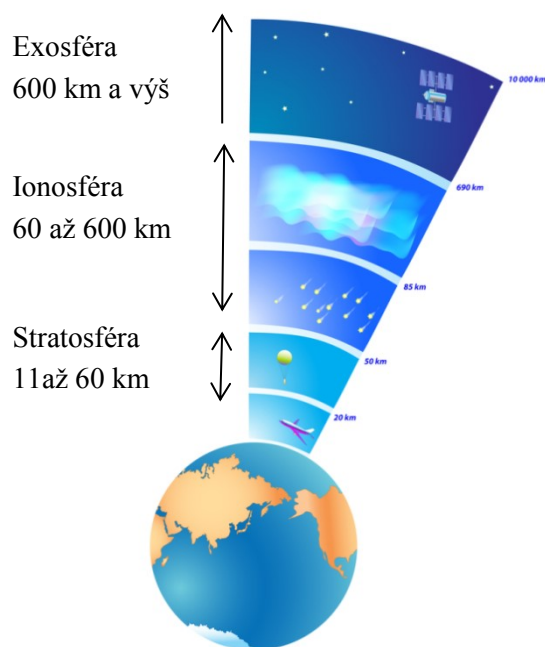
λ je vlnová délka [m]

D je vzdálenost mezi přijímačem a vysílačem [m]

d_1, d_2 je vzdálenost překážky od přijímače [m].

2.3 Zemská atmosféra

Zemskou atmosféru lze rozdělit na několik dalších vrstev, a to na troposféru (0 až 11 km), stratosféru (11 až 60 km), ionosféru (60 až 600 km) a exosféru (nad 600 km), pro názornou ilustraci je toto graficky znázorněno na obrázku 2.3. Hranice mezi těmito jednotlivými vrstvami jsou však pouze orientační a mohou se měnit v závislosti na geografické poloze a času. Z hlediska šíření rádiových vln je pro přenos signálů nejdůležitější nejnižší vrstva atmosféry, a to troposféra. Neméně důležitá je vrstva ionosféry, která je za jistých podmínek schopna odrážet elektromagnetické vlny. Troposféra je výrazně ovlivněna například povětrnostními vlivy, které mají vliv na šíření elektromagnetických vln. Z tohoto důvodu je v problematice šíření rádiových signálů nedílnou součástí meteorologie. Chemické složení troposféry je důsledkem působení větru konstantní, protože dochází k mísení jednotlivých prvků v atmosféře. Pro budování rádiových spojů je důležité studium srážek, rozložení teploty, tlaku a vlhkosti vzduchu v dané oblasti. Je jasné, že tyto jevy jsou náhodné, proto se vychází z dlouhodobých pozorování. Pro průměrný stav atmosféry je možné získat měřené referenční průběhy změn těchto atmosférických jevů [2].



Obrázek 2.3: Zemská atmosféra [9]

2.4 Metody šíření signálů

Metody a modely šíření rádiových vln lze charakterizovat jako množinu matematických výrazů, diagramů a algoritmů využívaných na reprezentaci rádiových charakteristik v konkrétním prostředí. Všechny dosud známé metody jsou založeny na geografických bázích dat s různým rozlišením a klasifikací. Správnost výběru algoritmu na projektování rádiového spoje a výstupního řešení je v největší míře určeno přesností popisu fyzikálních jevů, ke kterým dochází při dopadu rádiové vlny na rozhraní dvou prostředí, nebo na výrazné terénní nerovnosti. Jde především o popis difrakce, refrakce, rozptylu, odrazu a lomu rádiových vln. Doposud bylo navrženo množství predikčních modelů a algoritmů přičemž však není možné vybrat univerzální model, resp. model s nejvyšší přesností, modely se navzájem liší přístupem k řešení, složitostí a přesností. Mezi modely existuje i rozdíl v nárocích na požadované množství a přesnost informací o terénu, neboť na řešení intenzity elektrické složky elektromagnetického pole resp. ztrát je v některých případech postačující parametr zvlnění terénu a tedy není nutná výslovná informace o podrobném tvaru a vlastnostech terénu. Je možné rozlišit tři základní přístupy k predikci intenzity elektromagnetického pole [1].

- 1) **Empirické modely** jsou založeny na čistě statistické analýze. V případě užití empirických modelů jsou vzaty v úvahu všechny existující vlivy prostředí bez nutnosti jejich samostatného zkoumání. Na druhé straně, přesnost takových modelů nezávisí jen na přesnosti provedených měření, ale také na podobnosti analyzovaného prostředí a prostředí, ve kterém bylo statistické měření realizováno. Mezi nejznámější představitele těchto modelů patří Okumura-Hata [1], [2].
- 2) **Deterministické modely** jsou založeny na aplikaci známých fyzikálních principů šíření elektromagnetických vln a z tohoto důvodu mohou být aplikovány na různá prostředí bez snížení přesnosti [2].
- 3) **Semi-empirické modely** tvoří třetí skupinu typu modelů a jedná se o kombinaci dvou předešlých přístupů [2]. Do této kategorie spadá několik známých modelů šíření, například ITU-R P.1546 a ITU-R P.370.

3 Šíření rádiových signálů v pásmu UHF

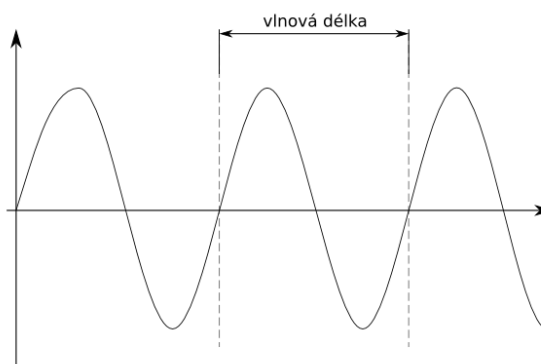
Ultrakrátké vlny na rozdíl od vln delších nemají schopnost odrážet se od horních ionizovaných vrstev zemské atmosféry. Díky tomuto faktu se ultrakrátké vlny nehodí na přenosy na velké vzdálenosti - například přes kontinenty, tudíž v přírodních podmínkách není možné uskutečnit rádiové spojení kolem země. Na druhou stranu nám ale ultrakrátké vlny umožňují komunikovat s tělesy umístěnými na oběžné dráze země a jenom s pomocí tohoto typu vln je možno s těmito družicemi komunikovat. Vzdálenost, na níž se ultrakrátké vlny šíří od vysílače, závisí na rozměrech vysílací a přijímací antény a je o něco větší než geometrický horizont, určený pouze zakřivením zemského povrchu. Příčinou toho je, že spodní vrstvy atmosféry (troposféra) mají větší hustotu a vlhkost, a tedy větší dielektrickou konstantu, a proto se v nich elektromagnetické vlny šíří menší rychlostí než ve vyšších vrstvách. Následkem toho se radiový paprsek ohýbá ve svislé rovině (refrakce) a zdánlivě se zvětšuje vzdálenost horizontu. Tento jev je patrný zvláště při výrazně nehomogenní atmosféře, například při slunečném počasí nad hladinou moře, kdy zakřivení radiového paprsku prudce vzrůstá a kdy se současně zvětšuje vzdálenost zdánlivého horizontu. Proto je možný občasný příjem televizního vysílání televizního střediska daleko za dosahem jeho normální působnosti. Avšak tímto způsobem nelze uskutečnit trvalé rádiové spojení na velké vzdálenosti. Při vzniku rádiových vln působením střídavého proudu procházejícího anténou se energie střídavého proudu mění v energii elektromagnetické vlny, šířící se do prostoru. Vysílací výkon je tím větší, čím vyšší je frekvence střídavého proudu při daných rozměrech antény, tedy čím je elektromagnetická vlna kratší [12]. Jevy působící na paprsek jsou patrné z obrázku 3.2.

Vlnová délka - viz obrázek 3.1, může být snadno vypočtena z jednoduchého vzorce:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad . \quad (3.1)$$

kde

- λ je vlnová délka[m]
- c je rychlost světla[m/s]
- f je frekvence[Hz].

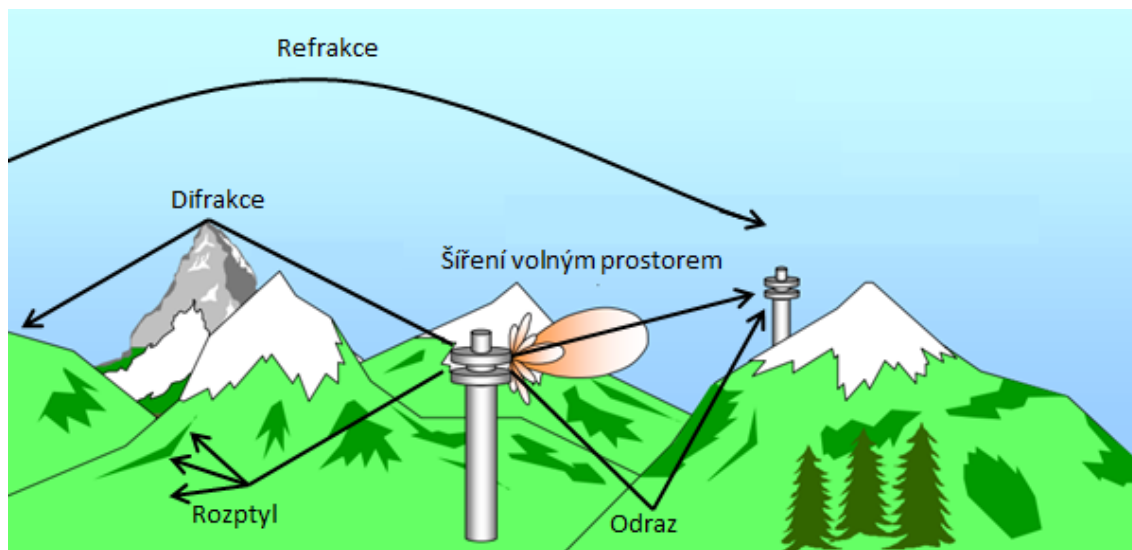


Obrázek 3.1: Vlnová délka

Pro přenos rádiového signálu v pásmu UHF jsou dominující následující způsoby přenosu:

- atmosférická refrakce,
- reflexe v atmosférických vrstvách na nižších frekvencích,
- přenos pomocí vlnovodného kanálu na vyšších frekvencích,
- zpětný rozptyl za horizontem na frekvencích větších než 500 MHz,
- refrakce v závislosti na změnách v atmosféře.

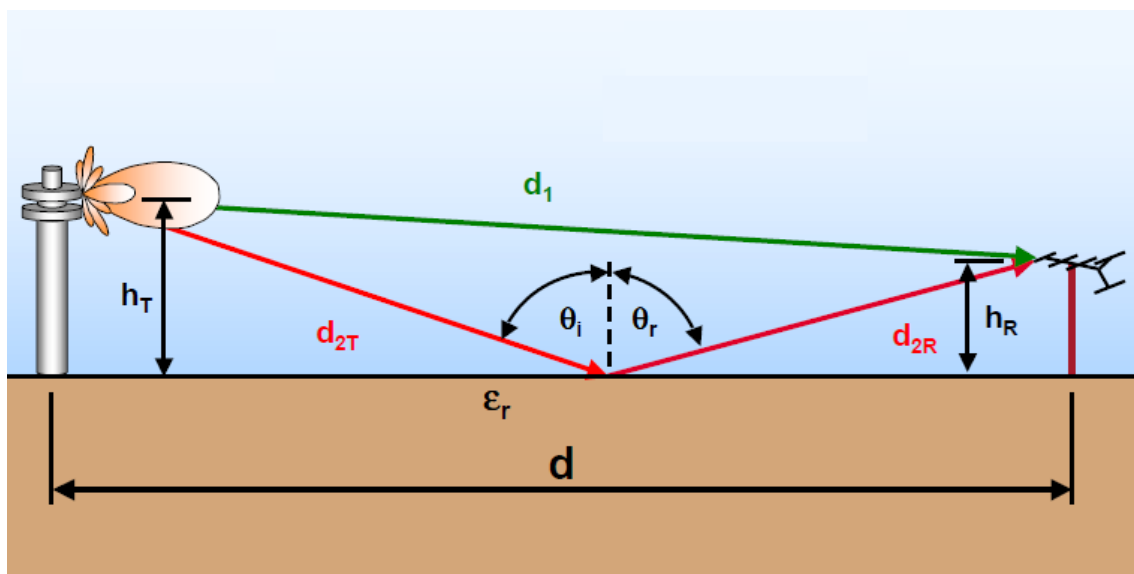
Za zmínku stojí i fakt, že pásmo UHF nám neovlivňují atmosférické jevy (déšť, mlha, sníh, kroupy), jelikož na frekvencích nižších než 6 GHz tyto jevy nepůsobí na paprsek. Jevy, které značně mají vliv na paprsek, jsou popsány v kapitolách 3.1 – 3.5



Obrázek 3.2: Znárodnění typů šíření [7]

3.1 Reflekce

Schopnost paprsku se odrážet poskytuje sekundární cestu mezi vysílačem a přijímačem, jako je znázorněno na obrázku 3.3. V místě příjmu potom přijímač přijímá právě ten signál, který bude mít lepší parametry. S reflexí úzce souvisí i schopnost tělesa absorbovat část energie. Absorpci si můžeme charakterizovat jako rádiovou energii, která může být absorbována materiály a tělesy, jako jsou stavební materiály, různé typy vegetace, vozidla a spoustou dalších těles. To platí, obzvláště pokud se anténa, která signál přijímá, pohybuje v čase, například při chůzi po ulici obklopené budovami, uvnitř lesa nebo uvnitř budovy. Vzhledem k tomu, že materiály, které mohou absorbovat energii, se liší ve vlastnostech a v tloušťce, tak je ve většině příkladů možné pouze odvodit typické údaje o úrovni ztráty síly signálu [1].



Obrázek 3.3: Reflektce [7]

Dráhu odraženého paprsku můžeme odvodit z vzorce:

$$d_2 = d_{2T} + d_{2R} , \quad (3.2)$$

kde

d_2 je dráha odraženého paprsku [m]

d_{2T} je dráha paprsku před odrazem [m]

d_{2R} je dráha paprsku po odrazu [m].

Dráhu d_1 – šíření signálu přímou cestou můžeme určit ze vztahu:

$$d_1 = \sqrt{d^2 + (h_R - h_T)^2} . \quad (3.3)$$

Dráhu d_2 – šíření signálu s využitím odrazu:

$$d_2 = \sqrt{d^2 + (h_R + h_T)^2} , \quad (3.4)$$

kde

h_R je výška přijímače [m]

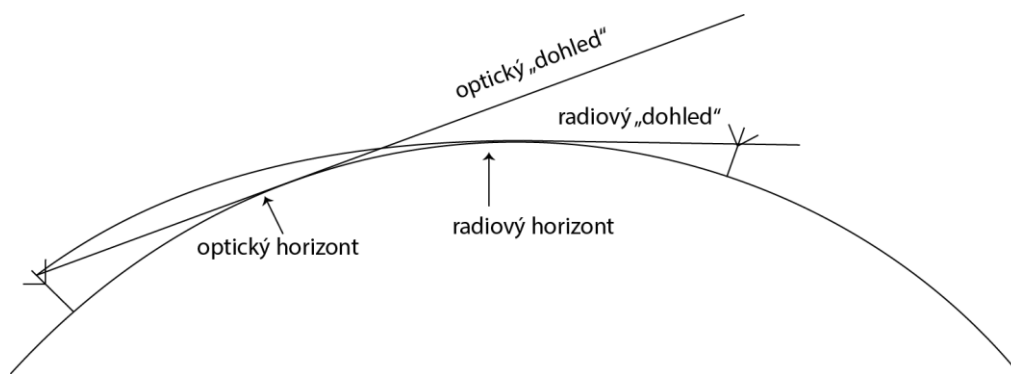
h_T je výška vysílače [m].

3.2 Rozptyl

Rozptyl vychází z principu odrazu, ale pro vznik rozptylu platí, že vzniká, pokud není povrch hladký a odrazy nejsou koherentní a žádným způsobem organizované. Díky těmto vlastnostem se tato situace vyskytuje v praxi více než klasický odraz. Rozdíl mezi rozptylem a odrazem lze vysvětlit na optickém příkladu. Pokud bychom se chtěli dívat na západ slunce nad klidným jezerem za jasné oblohy, tak můžeme vidět odraz slunce na vodě. Můžeme rovněž pozorovat i jiné detaily, jezero samotné, pobřeží, mraky atd. Tyto objekty jsou stále osvětlené stejným zdrojem (sluncem), ale to, co naše oči pozorují, je právě rozptyl slunečního paprsku a ne odraz, to je prakticky mechanismus, kterým naše oči vidí. Přesné modelování pomocí rozptylu je mnohem náročnější než pomocí odrazu, protože i malé změny polohy přijímače mohou mít za následek velké změny úrovně přijímaného signálu. Rozptyl z odchylek lomu v troposféře může být prospěšný a umožňuje nám komunikaci na velké vzdálenosti. Dosah takového přenosu je v řádu stovek kilometrů a má ideální podmínky pro příjem signálu i za rádiovým obzorem. Tento pojem označujeme jako troposférický odraz. Vzhledem ke ztrátám vlivem rozptylu je obvykle nutné pro přenos použít směrové antény a velmi vysoký vysílací výkon. Díky tomuto fyzikálnímu způsobu můžeme přenášet signál na největší vzdálenosti, ale vlivem interference jiných signálů může docházet při vyšších vzdálenostech k rušení jiných sítí v určitých oblastech [1].

3.3 Refrakce

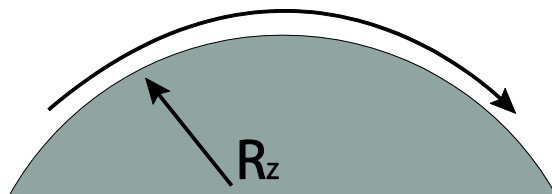
Refrakcí rozumíme změny atmosférického rádiového indexu lomu v různých úrovních atmosféry. V pozemních mobilních sítích jsou nejdůležitější oblasti poměrně blízko k povrchu Země (obvykle se jedná o první kilometr atmosféry). Obecně platí, že index lomu klesá s výškou, kde je nižší atmosférický tlak, ale také vlivem povětrnostních jevů v atmosféře. Typicky je index lomu „ohýbán“ směrem dolů, což nám mimo jiné umožňuje přenos rádiových signálů přes horizont, a to i bez spoléhání se na difrakční efekty.



Obrázek 3.4: Rádiová refrakce využívající zakřivení Země

3.4 Vlnovodný kanál

Speciální případ superrefrakce nastává, když poloměr křivosti paprsku je shodný s poloměrem Země (tzv. kritický lom v atmosféře). Vlna se pak teoreticky šíří kolem Země rovnoběžně s povrchem a po transformaci vyjde nekonečně velký efektivní poloměr země [2].

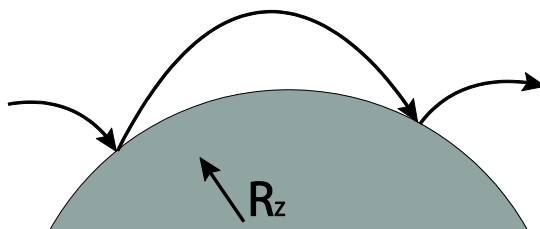


Obrázek 3.5: Kritický lom v atmosféře [2]

Z rovnosti $R_z = R_k$ získáme

$$R_k = R_z = 6378 = -\frac{10^6}{\frac{dN}{dh}} = -157 \text{ N/km} \quad (3.5)$$

Jestliže je výškový gradient refraktivity ještě menší než -157 N/km , ohýbá se vlna rychleji než je poloměr Země až dojde k jejímu odrazu od země. Jestliže tento stav troposféry v horizontálním směru trvá, je po odrazu vlna opět ohýbána směrem k zemi podle obrázku 3.6. Tímto způsobem se může elektromagnetická vlna šířit i na velmi velké vzdálenosti [2].



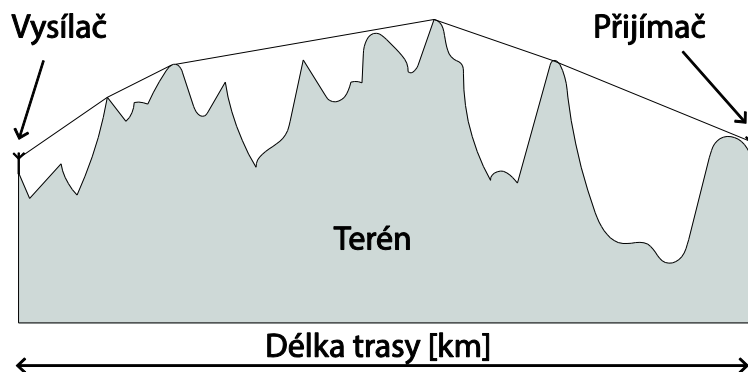
Obrázek 3.6: Superrefrakce[2]

Popsaný jev se označuje jako tzv. vlnovodný kanál. V praxi rozlišujeme dva typy vlnovodného kanálu: přízemní a vyvýšený, podle toho, je-li splněna podmínka $dN/dh < -157 \text{ N/km}$ při zemi nebo jen v určitém výškovém intervalu [2].

3.5 Difrakce

V mnoha případech může nastat, že cestě mezi pevnou základnovou stanicí a mobilním prvkem, který přijímá signál, bude bránit terén a jeho nerovnosti. V tom případě neexistuje přímá viditelnost a hlavním mechanismem, který působí na přenos signálu, je difrakce kolem

překážky. Pro názornost je toto uvedeno na příkladu na obrázku 3.7. Může existovat více než jedna překážka v cestě a v takovém případě může být signál ohnut nad překážku. Ztráta v úrovni signálu je ve srovnání se signálem, který se šíří ve volném prostoru, velmi významná, a proto se významně snižuje maximální dosah signálu. Dráha rádiového paprsku je významně omezována a působí na něj hned několik difrakcí. Ty se dají identifikovat podle kontaktních míst. Pro ilustraci je možné si představit difrakční mechanismus jako těsně napnutý provázek mezi přijímačem a vysílačem, který se dotýká nejvyšších překážek mezi těmito body. Některé modely tento mechanismus využívají k výpočtům [1].



Obrázek 3.7: Difrakční mechanismus [1]

V některých případech ztráty v důsledku difrakce mohou být takové, že energie přicházející z jednoho směru jiného než z vysílajícího elementu dominuje nebo kompletně zastíňuje přímou cestu. Může to být v důsledku odrazu a rozptylu, což vede k šíření mnohocestného paprsku. Toto je často označováno jako difrakční ztráta [1].

4 Modelování šíření signálu v pásmu UHF

Přesné modelování sítě ještě před jejím samotným vytvořením je základní stavební prvek pro tvorbu rádiových pozemních sítí. Bez této schopnosti, vymodelovat si výkon a pokrytí sítě ještě před tím než je zavedena, by mohlo docházet ke zkreslení výsledných hodnot a parametrů sítě. Díky spoustě typů modelů šíření a simulačních metod, které jsou určené pro různá prostředí, můžeme ještě před zavedením dané sítě optimalizovat výsledné hodnoty [3].

Z hlediska predikce rádiového šíření můžeme rozdělit modely pro plánování sítí do dvou kategorií a to plánování point-to-area (také označován jako základní síť) a point-to-point (označován jako specifická síť). V tomto ohledu model point-to-point neodkazuje na pevné spojení, ale spíše na to, že je možné jednoznačně popsat cestu mezi vysílačem a přijímačem podrobněji, je-li předpoklad, že přijímač je na konkrétním místě. Opakováním tohoto procesu pro všechny možné umístění přijímací antény je pak možné určit chování sítě mobilního účastníka. Modely point-to-area využívají méně přesné metody, ale vypočítávají intenzitu signálu pro větší oblast a ne jen pro konkrétní místo. Rozhodnutí o tom, jaký využít model závisí na spoustě faktorů. Pro různé situace je možno využít několik různých typů výpočetních modelů. Je třeba také poznamenat, že rozdíl mezi těmito dvěma modely mohou být ještě dále rozdělené na semi-empirické modely, které se odvozují od naměřených dat a ty které kombinují aspekty deterministických modelů na základě fyzikálních vlastností mezi vysílačem a přijímačem [1].

4.1 Výpočet pokrytí

Samotným cílem každého modelu je přesné stanovení pokrytí v žádané oblasti. Toto pokrytí můžeme definovat jako hodnotu sledovaného parametru v daném místě. Ovšem proti pevnému spoji nám nyní přibývá kromě náhodnosti v čase i náhodnost v poloze. Je možné se s tímto vypořádat například tak, že pro dané místo o předem definované ploše jsou modelované úrovně udávány podobně jako pro klasický radioreléový spoj distribuční funkcí pro jednotlivá procenta času, navíc však s podmíněnou platností pro určení procenta plochy [2].

V pásmu UHF může být problém v oblasti blízké vzdálenosti asi 10 až 15 km od vysílače. Zde může vlivem sčítání přímé a od zemského povrchu odražené vlny, která může být blízko vysílače ještě dosti silná vznikat tzv. oscilační pole. Velmi ostře se tak střídají minima a maxima intenzity signálu a je tak nutné doslova hledat nejsilnější signál, například v rozsahu celé střechy nebo pozemku.

Úroveň pokrytí v daném místě se udává buď jako intenzita elektromagnetického pole nebo jako výkon přijatý referenční anténou, typicky izotropním zářičem. Toto si můžeme vyjádřit pomocí vzorce pro výpočet výkonu přijatého izotropním zářičem z výkonové hustoty dané intenzitou elektromagnetického pole [2]:

$$P = A_{ef} W_{dop} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G \frac{E^2}{120\pi} = \frac{c^2}{480\pi^2 f^2} E^2, \quad (4.1)$$

kde je za zisk izotropického zářiče dosazen $G = 1$.

Ovšem praktičtější je vyjádřit si intenzitu elektromagnetického pole E v dB ($\mu\text{V/m}$):

$$E_{dBu} = 20 \log \frac{E}{10^{-6}} = 20 \log E - 20 \log 10^{-6} . \quad (4.2)$$

Výkon přijatý izotropním zářičem v dBm a frekvenci v MHz:

$$\begin{aligned} P_{dBm} &= 10 \log \frac{P}{10^{-3}} = 10 \log \frac{300^2}{480\pi^2 10^{-3} f_{MHz}^2} + 20 \log E = \\ &= 10 \log \frac{300^2}{480\pi^2 10^{-3}} + 20 \log 10^{-6} - 20 \log f_{MHz} + E_{dBu} . \end{aligned} \quad (4.3)$$

Získáme tak jednoduchý přepočet:

$$P_{dBm} = E_{dBu} - 77,2 - 20 \log f_{MHz} . \quad (4.4)$$

Díky decibelové míře, která zaručí úměrnost výkonu, je přepočet pro danou frekvenci pouze otázkou přčtení konstanty. Můžeme si všimnout, že závislost na frekvenci je spjatá v závislosti na přijímací anténě [2].

4.2 Modely point-to-area

Modely point-to-area jsou určeny k poskytnutí všeobecného odhadu rádiového šíření pro větší oblast vycházející spíše z nominálních charakteristik než z konkrétních údajů o trase. Obecnou formu takového modelu můžeme vyjádřit pomocí vzorce:

$$E_r = -\gamma \cdot \log(d) + K(P_{BS}, f, h_{BS}, h_{MS}) , \quad (4.5)$$

kde

E_r je intenzita pole [dBm/m]

d je délka dráhy [km]

γ je inverzní exponent použitý na délku dráhy

f je frekvence [MHz]

K je hodnota vycházející z výkonu [dBm, dBW].

h_{BS} je výška základové stanice [m]

h_{MS} je výška mobilní stanice [m]

Pro volný prostor můžeme využít následující rovnici:

$$L = 32,44 + 20\log f + 20\log d, \quad (4.6)$$

která je příkladem konkrétní implementace, pokud předpokládáme, že síla pole je:

$$E_r = P_{BS} - L \quad (4.7)$$

a dosazením těchto vztahů dostaneme rovnici volného prostoru s ohledem na sílu pole:

$$E_r = P_{BS} - 20\log d - 20\log f - 32,44. \quad (4.8)$$

Hodnota $20\log f$ je frekvenčně závislá na funkci K a hodnota 32,44 je konstanta, ke které dochází při konverzi jednotek do nejčastěji používané formy. Dosazením exponentu 20 před logaritmus docílíme ekvivalentu pro volno-prostorové ztráty, ve které jsou nejmenší ztráty síly intenzity elektromagnetického pole. Pro pozemní aplikace se nejčastěji dosazuje do rovnice exponent 48, který je typický pro městská anebo předměstská prostředí. Ostatní exponenty 25 a 30 se dosazují do rovnice pro různá smíšená prostředí, a to pro venkovská a příměstská. Zde je patrné základní dělení těchto modelů a jejich výpočetní model [1].

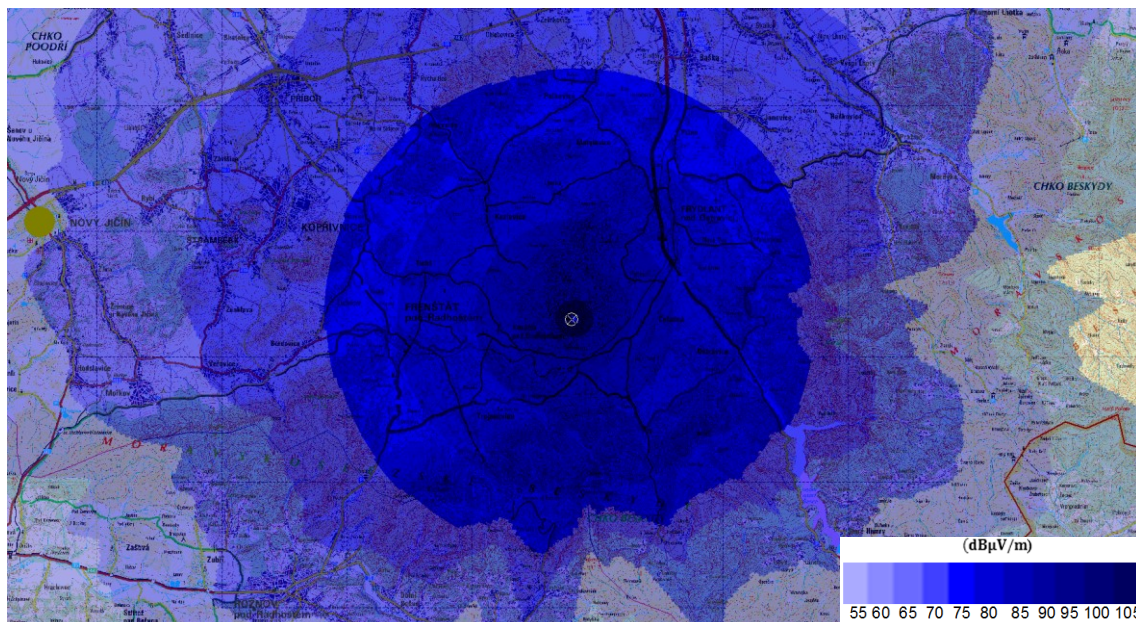
Všeobecně poskytují modely point-to-area horší korelaci s naměřenými výsledky v porovnání s dobře kalibrovanými point-to-point modely, ale to neznamená, že jsou méně použitelné. Tento typ výpočetních modelů je užitečný pro dimenzování sítí v rané fázi, kdy neznáme přesné umístění vysílačů a přijímačů. Jsou rovněž vhodné pro analýzu dlouhých cest, pro hodnocení rušení signálu a můžeme je taky využít, když nemáme k dispozici kvalitní terénní data [1].

4.2.1 ITU-R P.370

ITU-R P.370 byl použit jako doporučený model podle ITU po mnoho let, ale nyní byl nahrazen modelem ITU-R P.1546, který je rozšířený a vylepšený a tvoří základ mnoha metod pro domácí a mezinárodní použití. Poslední úprava tohoto standardu je z roku 1995, tudíž se jedná o velice zastaralý model šíření. Jedná se o tzv. koordinační model, který má tendenci přeceňovat intenzitu elektromagnetického pole v místě příjmu. Model ITU-R P.370 poskytuje řadu predikčních křivek pro frekvenční rozsah 30 - 1000 MHz a využití na vzdálenosti 10 - 1000 km. Efektivní výška vysílacích antén je 37,5 m až 1200 m a pro přijímací anténu 10 m nad zemí [5]. Při vykreslení pokrytí tímto modelem je patrné, že nevyužívá korekcí, ale používá pouze efektivních výšek vysílače a přijímače viz obrázek 4.1. Kompletní specifikace včetně všech vzorců pro výpočet je dostupná na přiloženém CD.

Výpočet terénních křivek lze pro pásmo UHF vyjádřit vzorcem:

$$J(v) = 8,1 - [6,9 + 20\log(\sqrt{(v - 0,1)^2 + 1} + v - 0,1)] . \quad (4.9)$$



Obrázek 4.1: Vykreslení pokrytí modelem ITU-R P.370

Z obrázku 4.1 je patrné, že model ITU-R P.370 bez využití korekčních metod je tzv. koordinační model, který přeceňuje intenzitu elektromagnetického pole v bodě příjmu. Tyto simulace tudíž mohou posloužit pouze jako orientační.

4.2.2 ITU-R P.1546

Model ITU-R P.1546 je metoda point-to-area rádiového šíření pro pozemní služby v rozsahu 30 MHz až 3000 MHz. Je určen pro použití v troposférických rádiových sítích. Tento výpočetní model je účinný do 1000 km vzdálenosti a pro maximální výšku antény do 3 000 m. Metoda je založena na interpolaci a extrapolaci z empiricky odvozených křivek výkonosti pole jako je vzdálenost, výška antény, frekvence a procenta času. Výpočetní proces zahrnuje i opravu výsledků obdržených právě z interpolace a extrapolace pro bezpečnou výšku nad terénem. Jedná se o novější náhradu výpočetního modelu ITU-R P.370. Nejnovější úprava standardu pochází z roku 2013 [6]. Kompletní specifikace včetně všech vzorců pro výpočet je dostupná na přiloženém CD.

Výpočet terénních křivek lze pro pásmo UHF vyjádřit vzorcem:

$$J(v) = [6,9 + 20\log(\sqrt{(v - 0,1)^2 + 1} + v - 0,1)] . \quad (4.10)$$

Model ITU-R P.1546 obsahuje řadu korekcí pro výpočet v terénu. Mezi ty v praxi používané patří **CA** (Clearance angle) a **DH** (Δh) [6].

Mezi hlavní vylepšení tohoto modelu vůči staršímu modelu ITU-R P.370 jsou:

- Využití interpolace a rozšíření frekvenčního rozsahu na 3000 MHz.
- Kalkulace i pro vzdálenosti menší než 10 km od vysílače (od 1 km).
- Terénní nerovnost se zde již nepoužívá jako parametr.
- Složitější výpočet u vysílače.
- Možnost pracovat se zápornou efektivní výškou (vysílač v nižší výšce, než přijímač) křivky rozšířeny na 10 m.
- Interpolace na časové proměnlivosti (mezi křivkami).
- Komplexnější výpočty vodních ploch [7].

Clearance angle korekce

Korekce se využívá v případě, že cesta mezi přijímačem a vysílačem je narušena jakoukoliv překážkou. Dosazením a vypočtením úhlů v této cestě rádiového signálu dostaneme korekční faktor s kterým je následně kalkulováno v základních výpočtech.

Korekci můžeme vypočíst z následujícího vzorce:

$$\theta_{tca} = \theta - \theta_r, \quad (4.11)$$

$$\theta_r = \arctang\left(\frac{h_{2s}-h_{1s}}{1,000d}\right), \quad (4.12)$$

kde

θ_{tca} je označení clearance angle korekce [stupně]

θ_r je referenční úhel [stupně]

h_{1s} je výška vysílače [m]

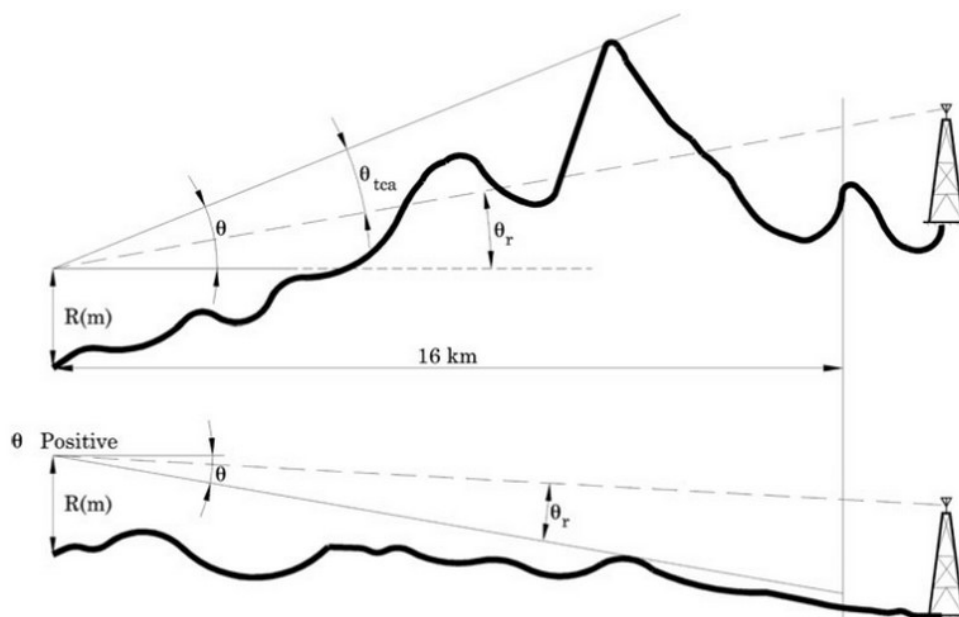
h_{2s} je výška přijímače [m].

Korekční faktor, který můžeme dále označovat jako α_c poté můžeme dosadit do rovnice 4.10, ale s úpravou, kdy dosadíme:

$$\alpha_c = J(V') - J(V). \quad (4.13)$$

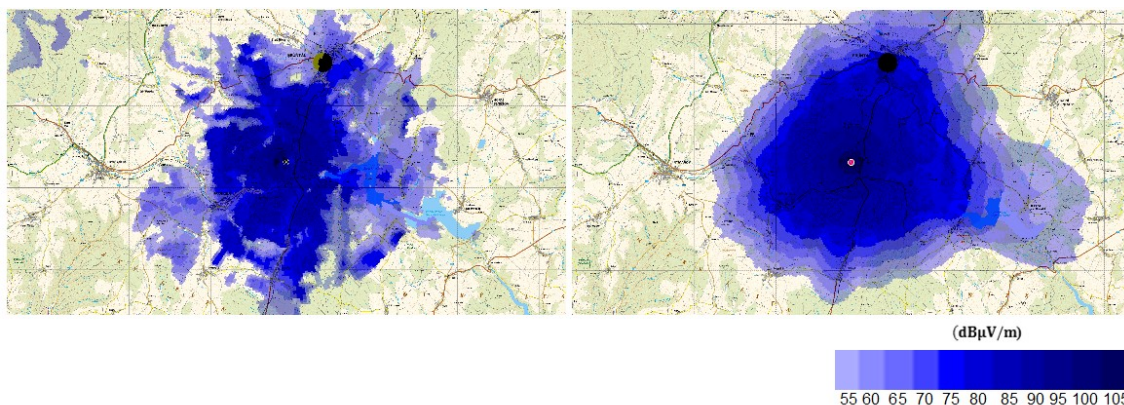
$$V' = 0,036\sqrt{f}. \quad (4.14)$$

$$V = 0,065 * \theta_{tca} * \sqrt{f}. \quad (4.15)$$



Obrázek 4.2: Ilustrace mechanismu Clearance angle [17]

Pro lepší ilustraci a samotnou demonstraci rozdílnosti korekcí modelu šíření ITU-R P.1546 jsou obě vygenerované mapy pokrytí na obrázku 4.3. Již na první lze vidět rozdílnou podobu ve vykreslené mapě pokrytí.



Obrázek 4.3: Vykreslení pokrytí modelem ITU-R P.1546 s korekcí pro Clearance angle (vlevo) a s korekcí Δh (vpravo)

4.2.3 Okumura-Hata model

Model Okumura Hata slouží pro modelování rádiových sítí zejména pro městská prostředí na frekvencích 200 - 1920 MHz. Je založen na Okumurově měření s vertikální polarizací, a na Hatově vzorci pro interpolaci. Nevhodné využití tohoto modelu – v horském prostředí je patrné z obrázku 4.4, kdy v porovnání s obrázkem 4.3 a 4.2 je patrné velice malé

pokrytí. Stejně jako modely ITU-R P.370 a ITU-R P.1546 je tento model založen na řadě měření v daných prostředích a tyto počáteční hodnoty pro výpočty byly potvrzeny velkým množstvím měření v různých prostředích. Tento model může být považován za soupeře plně deterministických metod a byl nejpřesnější pro městská prostředí z point-to-area modelů, ale není vhodný pro analýzu point-to-point propojení. Okumura-Hata model získal popularitu a oblíbenost zejména díky tomu, že není výpočetně náročný a potřebná přesnost údajů, které máme o prostředí, je relativně nízká. To bylo vhodné zejména v době, kdy počítače kalkulovaly s omezenou pamětí. Okumura-Hata model využívá speciálního výpočtu pro interpolaci, díky tomu jsou vykreslené mapy pokrytí tolik rozlišné od ostatních modelů [8].

Matematicky můžeme tento model formulovat následovně:

$$L_U = 69,55 + 26,16 \log_{10} f - 13,82 \log_{10} h_B - C_H + (44,9 - 6,55 \log_{10} h_B) \log_{10} d. \quad (4.16)$$

Pro malé a středně velké města:

$$C_H = 0,8 + (1,1 \log_{10} f - 0,7) h_M - 1,56 \log_{10} f. \quad (4.17)$$

A pro velké města:

$$C_H = \begin{cases} 8,29(\log_{10}(1,54h_M))^2 - 1,1, & \text{pokud } 150 \leq f \leq 200 \\ 3,2\log_{10}((11,75h_M))^2 - 4,97, & \text{pokud } 200 \leq f \leq 1500 \end{cases}, \quad (4.18)$$

kde

L_U je ztráta síly signálu [dB]

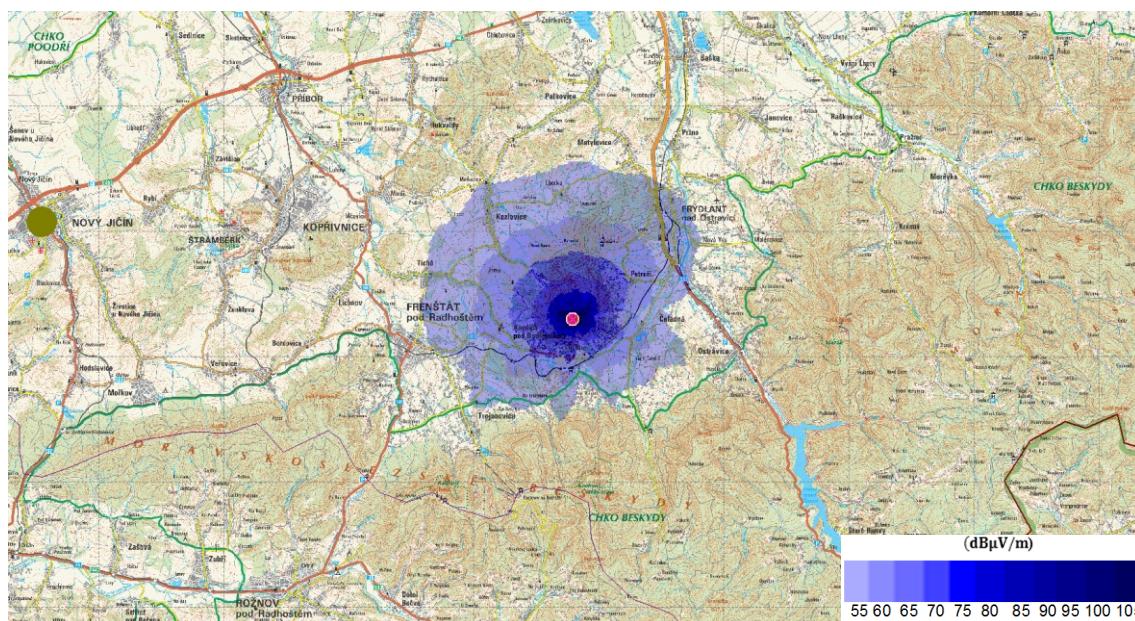
h_B je výška základové stanice [m]

h_M je výška přijímací stanice [m]

f je frekvence [MHz]

C_H je korekční faktor antény

d je vzdálenost mezi vysílací a přijímací stanicí [MHz].



Obrázek 4.4: Vykreslení pokrytí modelem Okumura-Hata

Z obrázku 4.4 - simulace pokrytí je patrné, že při umístění vysílače do hornatého prostředí, v našem případě na horu Ondřejník v oblasti Beskyd, je vykreslená oblast pokrytí značně zkreslená. Model Okumura-Hata není určen pro prostředí s vyšší mírou terénních nerovností a tudíž s nimi ani nijak nekalkuluje v svých výpočtech.

4.3 Modely point-to-point

Metoda point-to-point modelů vychází oproti point-to-area modelům z toho, že se při výpočtech zajímáme o konkrétní místo, ve kterém chceme znát výsledné parametry signálu. To se značně liší v přesnosti těchto dvou metodik měření. Point-to-point modely jsou mnohem přesnější, ale z hlediska praktického využití jsou méně využívány a používají se pouze v případech, kdy potřebujeme zjistit parametry na konkrétním místě [1]. Výpočet těchto typů modelů vychází ze základních principů Fresnelovy zóny – obrázek 2.2. Tyto modely jsou specifické například i v tom, že jsou to modely pro různá prostředí – například plně difrakční modely, které vycházejí z principu difrakce – viz kapitola 3.5. Pro potřeby praktického srovnání nebyly tyto modely použity v této práci.

4.3.1 Deygoutova metoda

Deygoutova metoda výpočtu patří mezi difrakční modely. Využívá specifický způsob výpočtu, kdy mezi vysílačem a přijímačem vyhledává rekurzivně difrakční hrany. Porovnává různé cesty, jakým je možné doručit signál k cíli. Pokud tato metoda nalezne vhodnou difrakční hranu, tak je přidána do pomyslného seznamu hlavních difrakčních hran. Rekurzivní způsob vyhledávání všech difrakčních hran je velice náročný na výpočetní výkon v porovnání s ostatními modely šíření. Na druhé straně tento model vykazuje velmi přesné výpočty s naměřenými výsledky [3].

4.3.2 ITU-R P.526

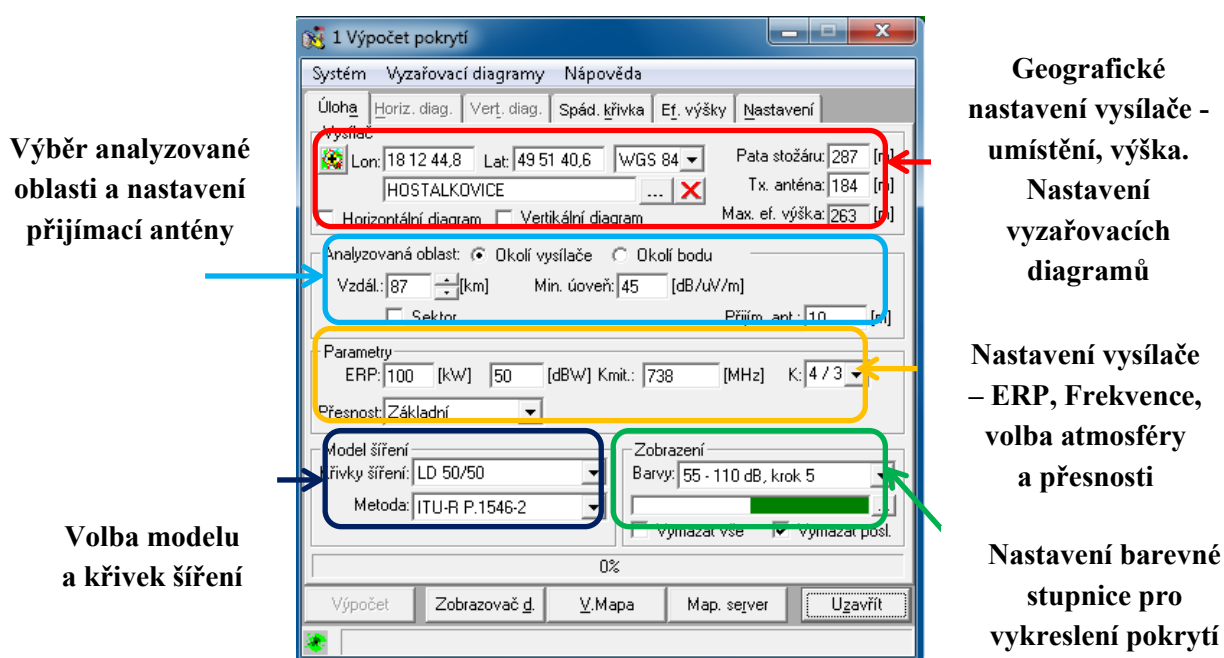
Model ITU-R P.526 je plně deterministický model založený na základních principech point-to-point modelů. Jedná se o model, který je založen na difrakčních principech a nabízí normogramy pro nepočítačové hodnocení difrakce země nad 30 MHz a výše. Tento model využívá pro výpočet terénu Deyghoutovu metodu omezenou maximálně pro tři difrakční hrany. Tato metoda se liší od Deyghoutovy v tom, že dvě sekundární difrakční hrany jsou stále považovány za cestu s přímou viditelností. Výpočet je intenzivnější než model Deyghoutův, ale přitom nezahrnuje potencionálně náročnější rekursivní metodu. Vzhledem k tomu, že model 526 je založen na fyzikálních základech, tak je obecně použitelný pro většinu rádiových spojení a je taky bezpečnější než empirické metody, které nejsou testovány pro aplikaci. Model 526 se používá pro plánování sítí v makrobuňkách, kde poskytuje velmi dobrý výkon [4]. Kompletní specifikace včetně všech vzorců pro výpočet je dostupná na přiloženém CD.

5 Srovnání metod s využitím simulačního softwaru

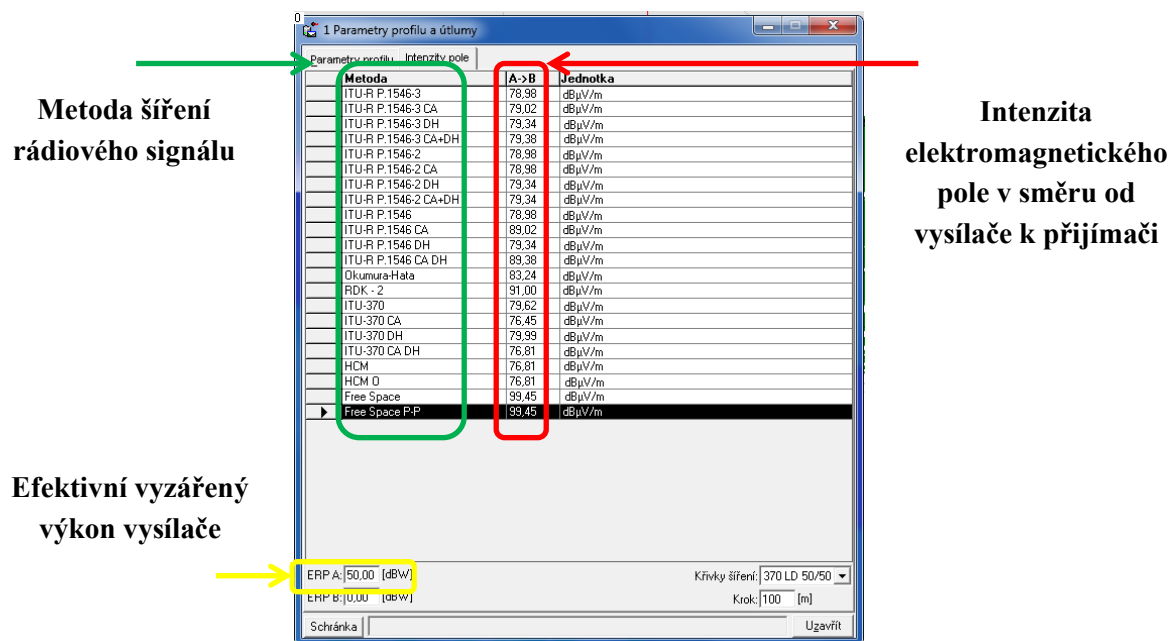
5.1 Softwarová realizace

Pro zpracování veškerých simulací byl využit program RadioLab, který je výpočetním systémem pro analýzu a vizualizaci šíření rádiových signálů nad zemským povrchem. Jedná se o inženýrský systém pro řešení úloh při analýze a návrhu radiokomunikačních systémů, jako je analýza terénního profilu, výpočet útlumů šíření signálu, výpočet rádiové viditelnosti a výpočet plošného rozložení intenzity elektromagnetického pole. Vedle výpočetních aplikací obsahuje RadioLab databázové aplikace pro organizaci dat vysílačů, mikrovlnných spojů a geografických objektů, mapový GIS (Geografický informační systém) pro zobrazení výsledků výpočtů a řadu nástrojů pro zefektivnění práce. Lze jej využít při řešení úloh plošného pokrytí, spojů point-point, systémů point-multipoint i mobilních systémů. Vedle rozsáhlé vlastní funkčnosti představuje systém RadioLab platformu pro integraci a běh dalších výpočetních systémů specializovaných např. na síťová řešení příslušné služby [13].

RadioLab je vhodný pro veškeré simulace z důvodu, že umožňuje manipulaci s volbou výpočetního modelu pro konkrétní simulaci pokrytí – viz obrázek 5.1. Díky této specifické vlastnosti, kterou nám poskytuje, jsme schopni porovnat různé modely šíření, které k této práci potřebujeme.



Obrázek 5.1: Výpočet pokrytí



Obrázek 5.2: Parametry profilu a útlumu

S ohledem na kmitočtovou závislost intenzity elektromagnetického pole, se v rozsahu kmitočtového pásma 470 – 862 MHz (rádiové kanály 21 až 69) pro jednotlivé úseky kmitočtů používají specifické hodnoty – viz tabulka 5.1. Tento problém jsem vyřešil v softwarové realizaci barevnou stupnicí pro vykreslený signál, kdy jsou barevně odlišeny hodnoty pro bezproblémový příjem signálu DVB-T. Příklad takového nastavení je patrný z obrázku 5.3.

Stupnice				
Pracovní				
			Uložit	Smazat
	Rozsah od	Rozsah do	Barva	Popis
▶	0,00	23,00		
	23,00	49,00		
	49,00	128,00		
*				

Obrázek 5.3: Nastavení barevné stupnice

Tabulka 5.1: *Rozsah rádiových kanálů* [16]

Rozsah rádiových kanálů	Hodnota intenzity E_{min} (dBμV/m)
5-6	48
7-9	49
10-12	50
21-22	52
23-30	53
31-38	54
39-47	55
48-58	56
59-69	57

5.2 Realizace praktického měření

Pro bližší zkoumání modelů šíření v softwarové simulaci jsem zvolil několik metodik posouzení vhodnosti a porovnatelnosti. Ze znalostí o výpočetních modelech jsem určil několik typů prostředí, ve kterých jsem tyto měření provedl. Vzhledem k tomu, že jsou k dispozici pouze omezené informace intenzit elektromagnetického pole v konkrétních oblastech, vytvořil jsem několik vysílačů a umístil je do specifických oblastí. Konkrétně jsem zvolil oblast s vysokou mírou urbanizace (Ostrava), kde jsem pro porovnání modelů využil srovnání hodnot intenzity elektromagnetického pole. Následně jsem provedl simulaci horského prostředí (Beskydy), kde pro porovnání modelů je využito znalostí o šíření signálů a následné optické porovnání všech map pokrytí. Poslední simulace spočívá v sérii měření pro vysílač Hošťálkovice, kde jsem podle údajů poskytovatele, kterým jsou České Radiokomunikace, porovnal hodnoty, které se udávají jako referenční [15]. Rovněž jsem hodnoty porovnal s portálem Mapa Vysílačů [14], který využívá pro výpočty programu RadioMobile. Výstupem srovnání s využitím simulačního softwaru je určení vhodnosti modelů a porovnání těchto modelů.

5.3 Simulace na vysílači Hošťálkovice

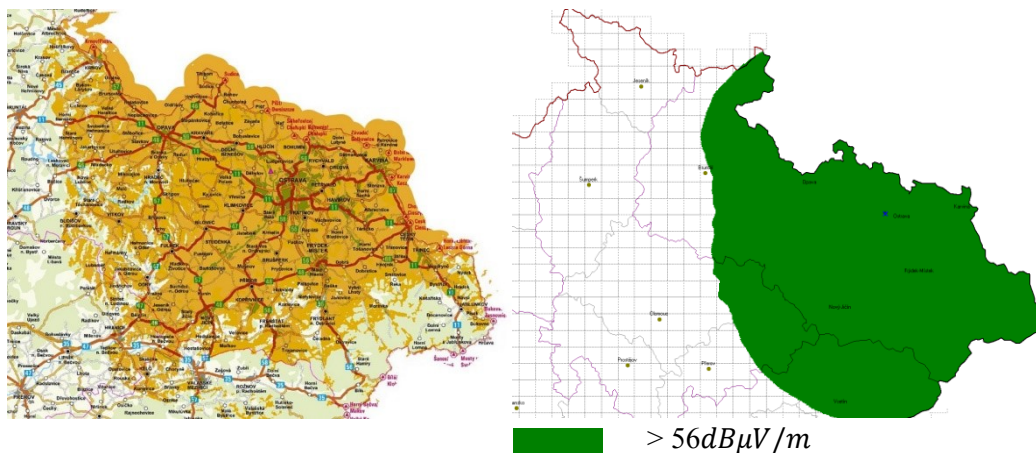
Při této simulaci bylo využito reálných hodnot a parametrů vysílače Hošťálkovice. Tyto hodnoty byly nastaveny do programu RadioLab pro výpočet pokrytí – viz příloha B. 1. Jelikož nejsou k dispozici reálné hodnoty intenzity pole, provedl jsem porovnání pro tento vysílač v několika krocích. Postup byl následovný:

- Optické porovnání s vygenerovanou mapou poskytovatele.
- Optické porovnání s hodnotami portálu Mapa Vysílačů.
- Průzkum hraniční oblasti s minimální intenzitou elektromagnetického pole pomocí profilu trasy a intenzity.
- Porovnání vygenerovaných hodnot a map pokrytí.



Obrázek 5.5: *Hošťalkovický vysílač [15]*

Již při prvotní simulaci byla patrná nevhodnost některých modelů šíření, která se značně lišila s údaji od provozovatele – viz obrázek 5.6. Díky znalostem získaných ze studia výpočetního algoritmu těchto modelů, jsem věděl, proč zde nastávají velké rozdílnosti. Některé výpočetní modely neobsahují ve své kalkulaci korekci pro terénní nerovnosti, a tudíž jsou tyto modely vhodné pouze pro orientační simulaci případně pro oblast, která je homogenní.

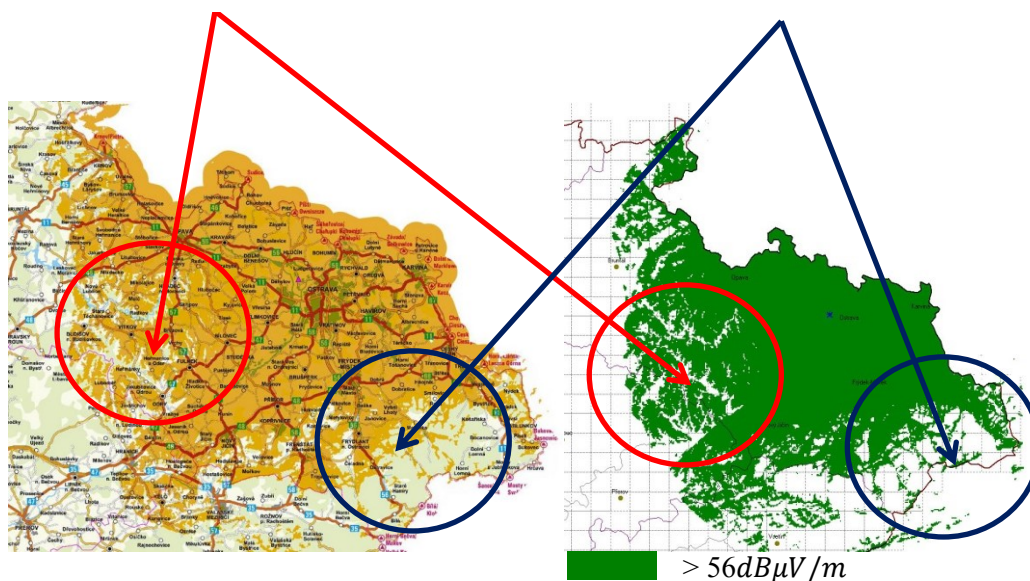


Obrázek 5.6: *Porovnání referenčních hodnot od provozovatele vysílače [15] a vygenerovanou mapou pokrytí pro model ITU-R P.370*

Na druhé straně se při simulaci již projevily modely vykazující vyšší přesnost – viz obrázek 5.7. Zde ve zvýrazněných bodech lze vidět identitu s referenční mapou, tudíž může být tento typ šíření považován za vhodný pro přesnou simulaci. Konkrétně díky korekci, která bere v potaz fakt, že v místě je překážka v podobě hory, kopce nebo údolí.

**Oblast v okolí Hradce nad Moravicí –
oblast s údolím a protékající řekou.**

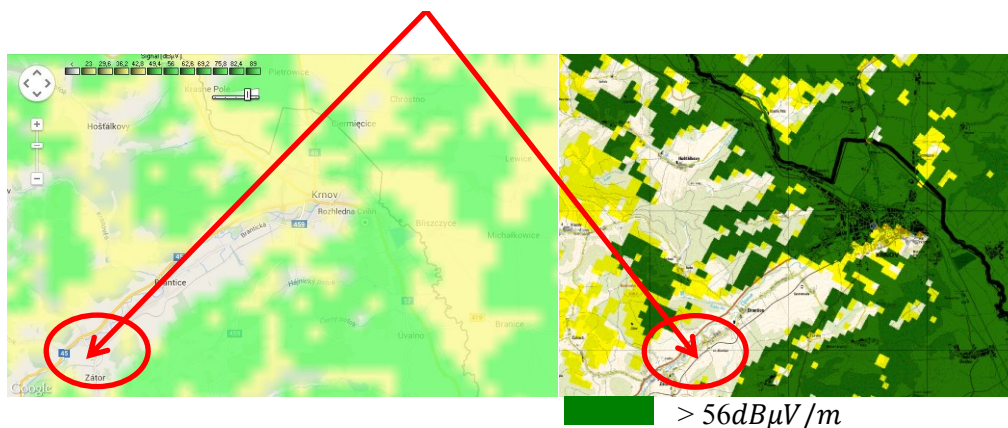
**Oblast v okolí Beskyd, překážky
v podobě hor.**



Obrázek 5.7: Porovnání referenčních hodnot od provozovatele vysílače [15] a vygenerovanou mapou pokrytí pro model ITU-R P.1546 s korekcí pro Clearance angle

Jednou z dalších metod srovnání modelů bylo porovnání detailních bodů v okrajových oblastech pokrytí. Na obrázku 5.8 lze vidět oblast v okolí Krnova, kde již není pokrytí ideální a následné porovnání s mapou pokrytí z portálu Mapa vysílačů.

Obec Zátor - oblast bez pokrytí signálu



Obrázek 5.8: Porovnání referenčních hodnot z portálu Mapa vysílačů (vlevo) [14] a vygenerovanou mapou pokrytí pro ITU-R P.1546 CA+DH

Pro zvýrazněnou oblast z obrázku 5.8 – obce Zátor je patrné, že se jedná o oblast s intenzitou elektromagnetického pole tak malou, že zde již není možný příjem DVB-T.

Příčinou je narušení Fresnelovy zóny – viz obrázek A.3. Proto jsem zde pomocí profilu změřil hodnoty intenzity elektromagnetického pole, abych je následně mohl porovnat a zahrnout je do výsledného srovnání:

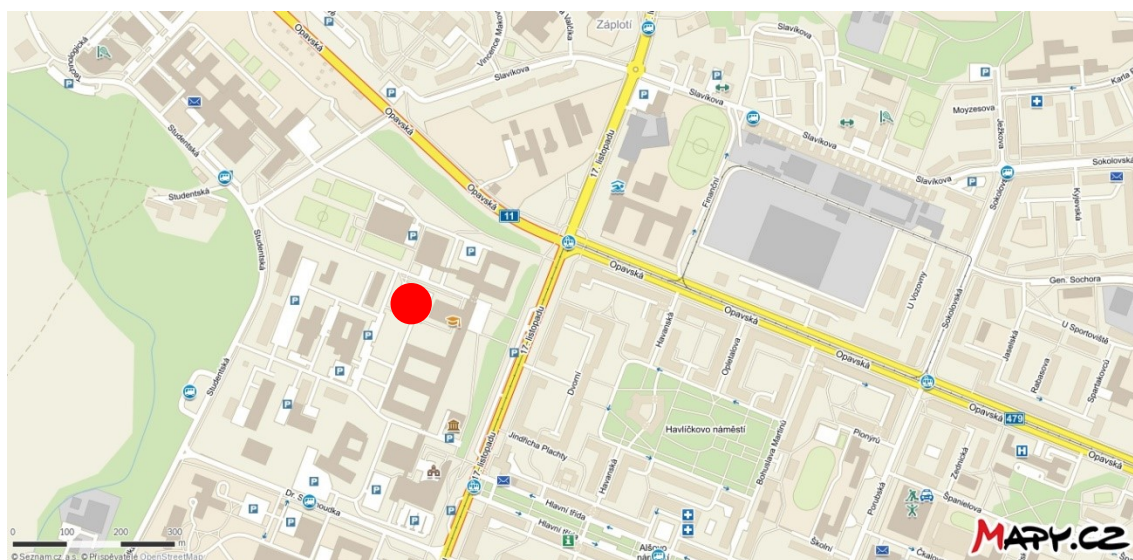
Tabulka 5.2: Srovnání naměřených hodnot

Metoda	Hodnota intenzity (dB μ V/m)
Okumura - Hata	69,44
ITU-R P.370	61,94
ITU-R P.1546-3	61,74
ITU-R P.1546-3 DH	49,80
ITU-R P.1546-3 CA	43,35
ITU-R P.1546-3 CA+DH	31,44

Veškeré grafické výstupy v podobě map pokrytí jsou dostupné v příloze umístěné na CD.

5.4 Prostředí s vysokou mírou urbanizace

Jako vhodné umístění vysílače s vysokou mírou urbanizace jsem použil oblast Ostravy a blízkého okolí, konkrétní umístění vysílače je patrné z obrázku 5.9. Jedná se o jeden z vysílačů o malém výkonu, které jsem vytvořil pro potřeby bližšího zkoumání chování výpočetních modelů šíření. V tomto prostředí jsem si vyzkoušel chování modelů v blízké oblasti vysílače a jejich kalkulace se zástavbou. Vzhledem k tomu, že jsou dostupné veškeré morfologické data této oblasti, tak přesnost výpočtu pro metody by měli vykazovat vysokou přesnost. Na druhé straně nejsou k dispozici žádné ověřené data, které by mohly tento výsledek potvrdit, ovšem pro potřeby srovnání těchto modelů je tato simulace dostačující.



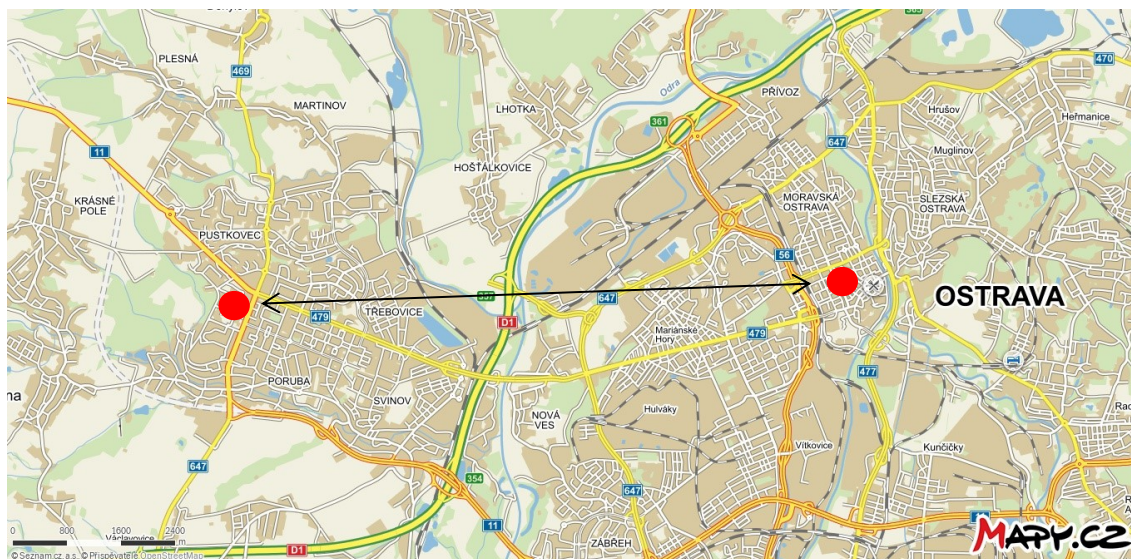
Obrázek 5.9: Umístění vysílače [18]

Parametrizace vysílací antény:

ERP	0,1 kW
Kmitočet	872 MHz
Minimální úroveň	55 dB/μV/m
Tx antény	30 m

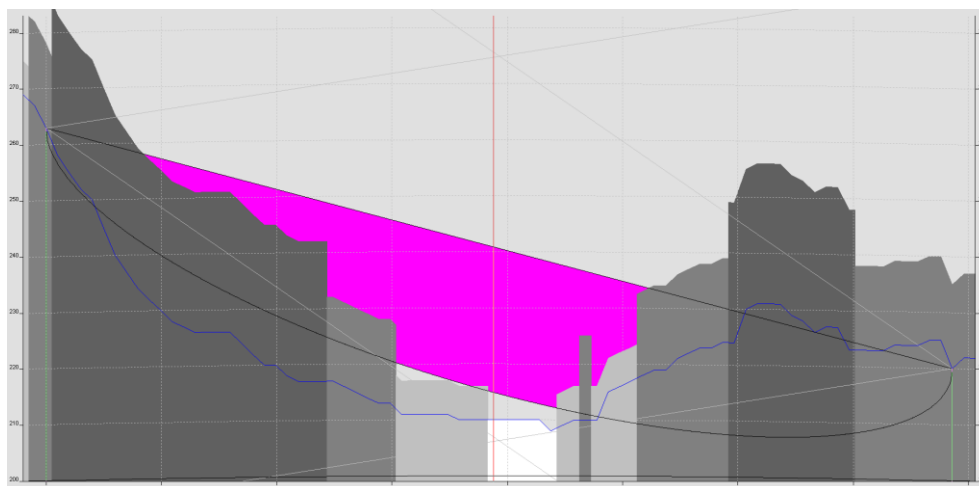
Porovnání modelů pro danou oblast

V analyzované oblasti jsem vytvořil profil mezi vysílačem a přijímačem. Konkrétně jsem umístil přijímač na nemocnici v Moravské Ostravě. Z naměřených parametrů uvedených do tabulky 5.2 je patrné, že největší útlum zde nastává kvůli morfologickým překážkám v trase, ty jsou rovněž patrné z obrázku 5.10.



Obrázek 5.10: Analyzovaná trasa [18]

Pro ujistění, že máme k dispozici morfologické data dané oblasti a pro lepší ilustraci jsem pomocí profilu vykreslil, do jaké míry nám zasahuje zástavba do Fresnelovy zóny, toto je patrné z obrázku 5.11.



Obrázek 5.11: Fresnelova zóna se zahrnutými morfologickými údaji

Rozbor naměřených dat

Tabulka 5.3: *Naměřené veličiny*

Veličina	Hodnota
Délka profilu	7,86 Km
Útlum šířením	109,17 dB
Útlum překážkou (K=4/3)	49,03 dB
Útlum překážkou s morfologií (K=4/3)	159,57 dB

Tabulka 5.4: *Srovnání hodnot*

Metoda	Hodnota intenzity (dBμV/m)
ITU-R P.370	99,62
ITU-R P.1546-3	86,27
ITU-R P.1546-3 DH	86,27
RDK-2	79,01
ITU-R P.1546-3 CA	67,15
Okumura-Hata	65,22

Na základě naměřených dat z tabulky 5.4 lze vyčíst, že v bodě příjmu dosahuje největší intenzity pole model ITU-R P.370. V praxi to ale neznamená, že tento model vykazuje nejpřesnější hodnoty, jelikož nezahrnuje veškerá potřená data pro přesnou kalkulaci. Naopak za nejpřesnější se dá považovat model ITU-R P.1546-3 s korekcí pro clearance angle a Okumura-

Hata, které tyto nezbytné data obsahují (kalkulaci se zástavbou, nehomogenitu terénu, minimální vzdálenost od vysílače, ...).

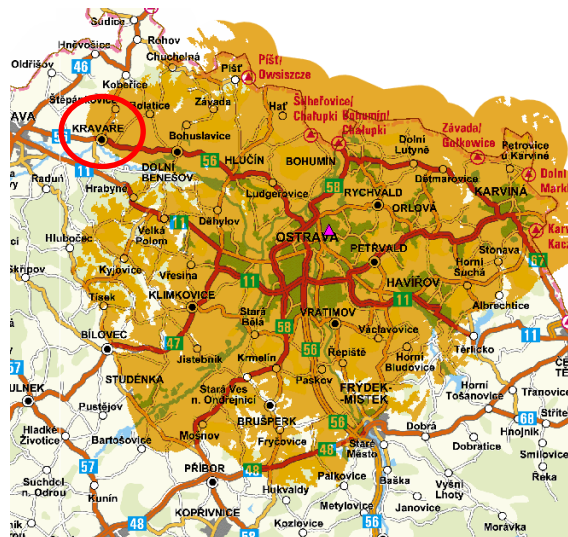
Vysílač Ostrava – Hladnov

K potřebám praktického porovnání v oblasti s vysokou mírou urbanizace byla provedena rovněž simulace na vysílači v Ostravě – Hladnově (Slezská Ostrava). Parametrizace vysílače jsou dostupné v příloze B. 2. Grafické výstupy v podobě map pokrytí jsou uvedené v příloze A. 5. a A. 6.



Obrázek 5.12: Vysílač Ostrava-Hladnov [15]

Z mapy pokrytí udávané provozovatelem byla nalezena hraniční oblast pro příjem signálu DVB-T – viz obrázek 5.13. Zde bylo pomocí profilu uvedeno přeměření hodnot intenzity elektromagnetického pole pro město Kravaře – viz tabulka 5.5

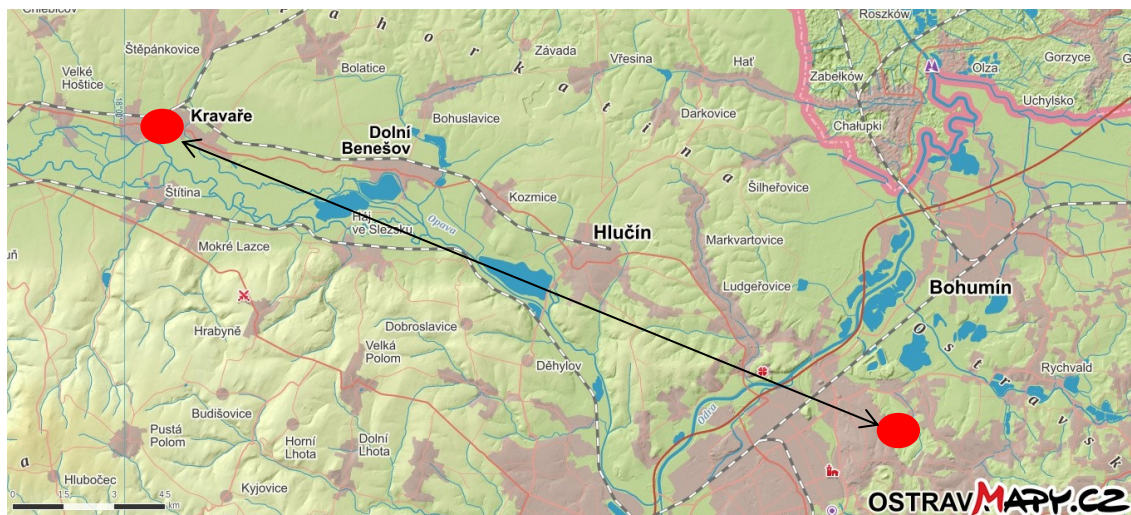


Obrázek 5.13: Vysílač Ostrava-Hladnov – oficiální mapa pokrytí [15]

Tabulka 5.5: Srovnání hodnot

Metoda	Hodnota intenzity (dB μ V/m)
RDK - 2	65,00
Okumura - Hata	62,16
ITU-R P.1546-3 CA+DH	55,79
ITU-370	54,22
ITU-R P.1546-3 CA	53,99
ITU-R P.1546-3	53,95

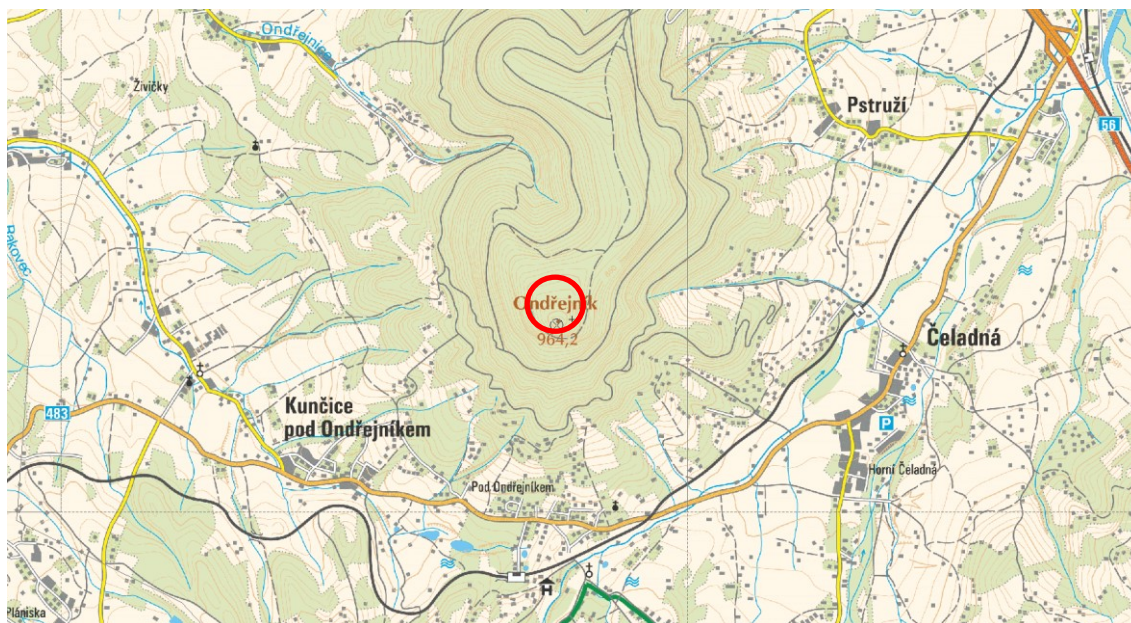
Při pohledu na tabulku 5.5 je patrné, že zde nejmenší intenzitu elektromagnetického pole vykazuje model ITU-R P.1546-3 což je v porovnání s ostatními simulacemi nezvyklé. Jelikož tento model bez použití korekcí se jeví ve většině simulací jako koordinační – přeceňuje hodnoty elektromagnetického pole. Vysvětlení je jednoduché a plyne z obrázku 5.14. a z přílohy A.4. Na této trase není vysoký výskyt terénních překážek, proto není nutné využít korekce pro zvlnění terénu.



Obrázek 5.14: Vysílač Ostrava-Hladnov – morfologická mapa [18]

5.5 Horské prostředí

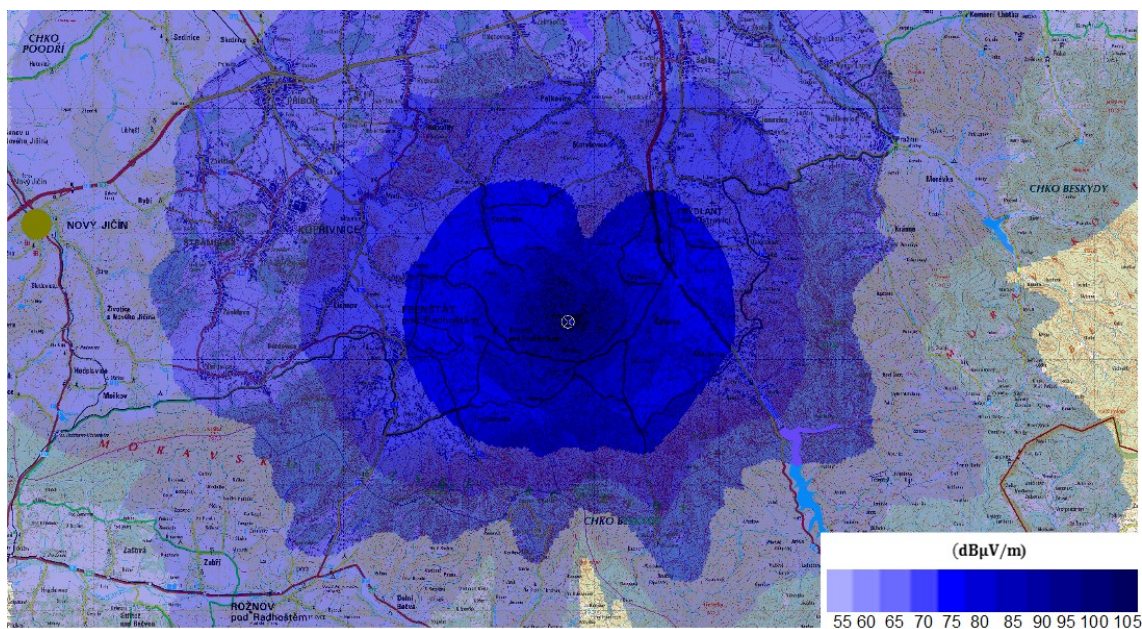
Pro tuto simulaci jsem využil pro umístění vysílače prostředí v Beskydech a to horu Ondřejník v nadmořské výšce 964 m – viz obrázek 5.15. Na základě série měření jsem došel k patřičným závěrům. Na této simulaci lze pozorovat největší rozdíly ve vykreslených mapách pokrytí, které dobře poslouží k následnému porovnání. Kompletní srovnání vykreslených map pokrytí je dostupné v příloze A.2.



Obrázek 5.15: Umístění vysílače v hornatém prostředí v Beskydech

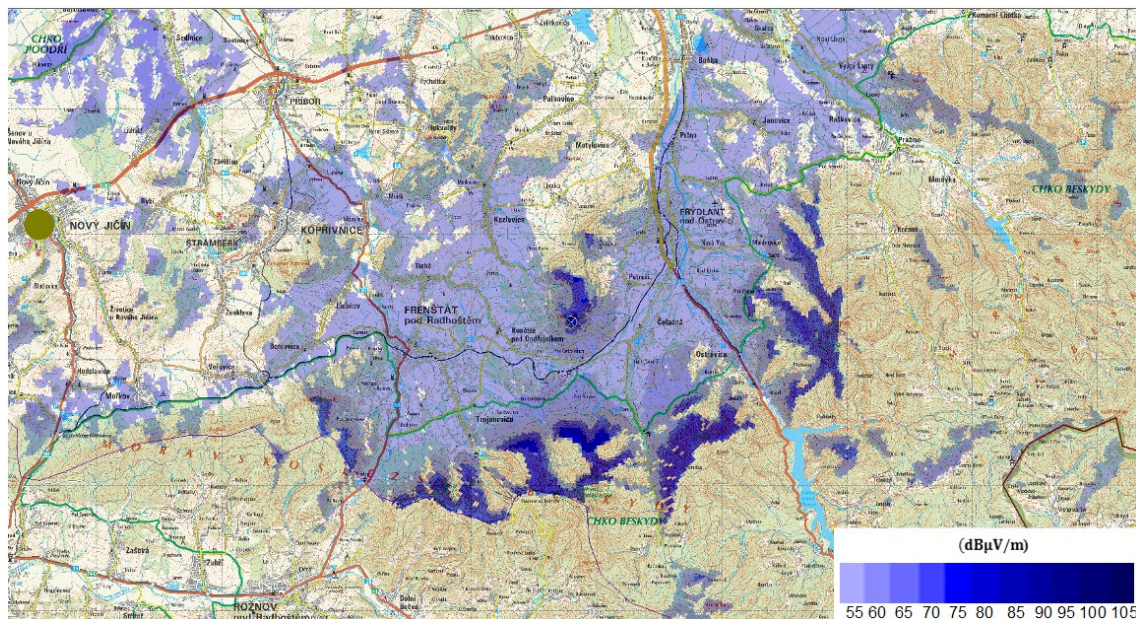
ITU-R P.1546

Samotný model šíření, bez použití opravných korekcí pro nedokonalosti a nerovnosti terénu je v praxi nevyužitelný pro simulace. Může nám posloužit pouze pro orientační výpočty pokrytí – viz obrázek 5.16. Z umístění vysílače – viz obrázek 5.15 plyne, že se daná oblast nachází v členitém terénu a při samotném vykreslení mapy pokrytí model ITU-R P.1546 bez korekcí, nebere tento fakt v úvahu při svých výpočtech.



Obrázek 5.16: Simulace v horském prostředí modelem ITU-R P.1546

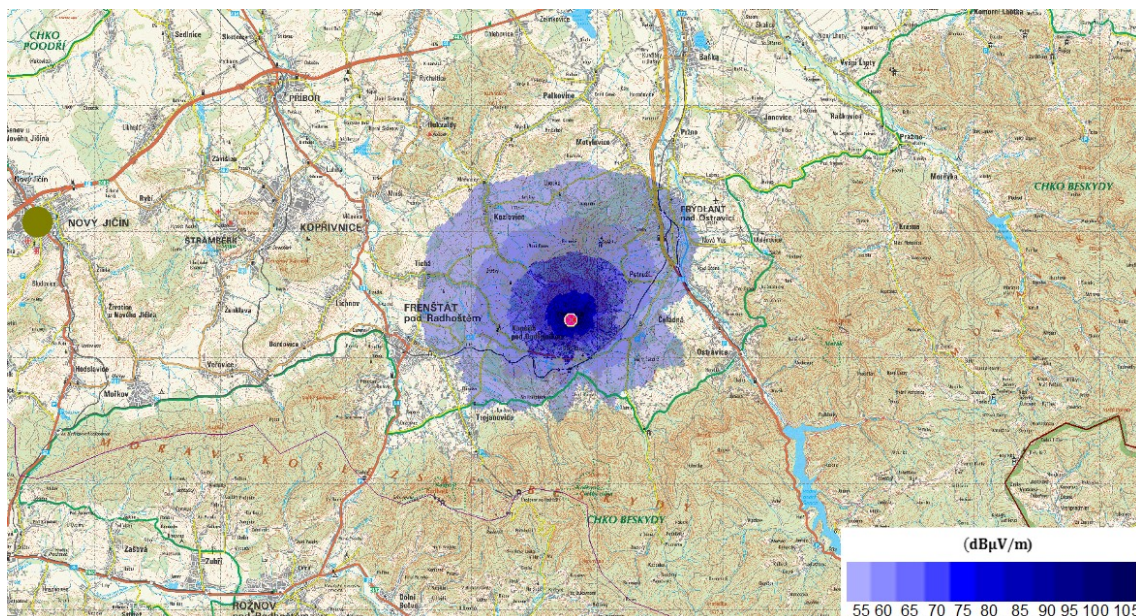
K tomu, abychom zabránili nedokonalostem při výpočtech map pokrytí, je nutné využít korekci. Pro horské oblasti je nejvhodnější využít korekci CA.



Obrázek 5.17: Simulace v horském prostředí modelem ITU-R P.1546 s využitím korekce Clearance angle

Okumura-Hata

Měření pro tento model a samotné výpočty pokrytí, jsou značně zkrácené oproti ostatním modelům – viz obrázek 5.18. Je to dáno tím, že se jedná o model primárně určený pro města a v terénu tudíž nekalkuluje optimálně s případnými překážkami.



Obrázek 5.18: Simulace v horském prostředí modelem Okumura-Hata

6 Rozbor dosažených výsledků

Cílem tohoto rozboru bude popsání samotných naměřených a vygenerovaných výsledků pro konkrétní modely, které jsem využil v této práci.

ITU-R P.370-7

Pro model šíření, který je využit v této práci bylo dosaženo několika závěrů, v kterých je patrná odlišnost od ostatních modelů:

- Model vykazuje v sériích měření vysoké hodnoty intenzity elektromagnetického pole vůči ostatním zkoumaným modelům, z tohoto údaje lze usoudit, že se jedná o model tzv. koordinační – který přeceňuje tuto hodnotu elektromagnetického pole.
- Vzhledem k omezení frekvenčního rozsahu, pro která tento model vzniknul, není vhodný pro simulace v celém pásmu UHF.
- V oblastech, které byly blíže zkoumány a byly označeny za oblasti, kde již není možný příjem signálu s požadovanou intenzitou, model intenzitu stále vykazoval.

ITU-R P.1546-3

Při zkoumání tohoto modelu, ať už ze stránky teoretické či praktické bylo dosaženo k závěrům, které tento model blíže specifikují:

- Při použití samotného modelu bez korekcí se tento model jeví jako model koordinační, kdy dochází k přeceňování hodnot elektromagnetického pole.
- Využitím korekcí a následným dosazením do výpočetního algoritmu dochází k přesným výpočtům pokrytí, které se nejvíce shodují s reálnými hodnotami. Nejpřesnější hodnoty vykazuje použitím korekčního algoritmu CA, který započítává členitosti terénu do samotného výpočtu.
- Na rozdíl od ostatních modelů, které jsou využity v této práci, jsou hodnoty elektromagnetického pole v přímé blízkosti vysílače přesnější.

Porovnáním s ostatními modely šíření se jeví tento model nejvšestrannější a při využití korekčního algoritmu pro členitost terénu se dá využít pro všechny typy prostředí. Z tohoto důvodu jej využívají i provozovatelé samotných vysílačů při plánování rádiových sítí. Bez použití korekcí by byl model vhodný jedině v případě, kdyby bylo prostředí homogenní.

Okumura-Hata

Využití modelu Okumura-Hata pro veškeré simulace je značně limitováno koncepcí tohoto modelu, která je směřována na městská prostředí. Informace, kterých bylo dosaženo o tomto modelu se dají charakterizovat následovně:

- V městském prostředí tento model vykazuje díky své koncepci přesné hodnoty v porovnání s referenčními hodnotami provozovatele vysílačů.
- Model je nevhodný pro simulace v členitém terénu.
- Při detailních průzkumech oblastí na větší vzdálenosti se model jeví jako koordinační.

O použitelnosti modelů v této práci se dá do jisté míry spekulovat. Je patrné, že modely jsou koncipovány pro specifické oblasti, kde se dají použít. Při samotné softwarové realizaci vyšly najevo koncepce těchto modelů a při použití a srovnání s jinými modely šíření se tyto specifikace projeví. Praktické výsledky měření potvrdily poznatky získané ze studia teoretické části a demonstrovaly nevhodné využití konkrétního modelu šíření.

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo popsání metod a modelů šíření rádiových signálů ve frekvenčním pásmu UHF. Pomocí těchto znalostí, které jsem načerpal ze studijní literatury a norem, jsem poté realizoval praktickou část, ve které jsem na typových příkladech demonstroval a porovnával chování těchto modelů v různých prostředích.

Při této práci jsem si osvojil možnosti modelování sítí s využitím simulačního softwaru RadioLab a další nezbytné předpoklady pro plánování rádiových pozemních sítí. Rovněž jsem se blíže seznámil s principem šíření elektrických vln ve frekvenčním pásmu UHF a jeho specifickými vlastnostmi, které má a s kterými je nutné počítat při používání tohoto pásma. Velkou neznámou pro mě byly ze začátku samotné modely šíření, protože jsem se setkal do té doby při simulacích pouze se základními (defaultními) nastaveními pro simulace, ale s odstupem času a na sérii nepovedených měření jsem se s těmito modely více ztotožnil. Jelikož je pásmo UHF velmi využíváno, tak jsou tyto informace o samotném šíření jistým přínosem i pro případné čtenáře této práce.

Hlavním přínosem této práce je specifický pohled na způsob porovnání modelů šíření. Jeho součástí je samotný popis modelů šíření pro pásmo UHF a demonstrace jejich použitelnosti s využitím simulačního softwaru. Využil jsem veškerých podkladů, které jsem měl k dispozici, ať už dat od provozovatelů a tvůrců samotných modelů. Na typových příkladech jsem demonstroval, kdy je možné využít daný model šíření při plánování pozemní rádiové sítě.

Možná vylepšení práce do budoucna vidím v realizaci praktického měření v terénu a zkoumání samotných vlastností rádiového signálu v konkrétních bodech s následným porovnáním těchto hodnot s hodnotami nasimulovanými pro stanovení přesnosti modelů šíření.

Seznam použité literatury

- [1] GRAHAM, Adrian W, Nicholas C KIRKMAN a Peter M PAUL. *Mobile Radio Network Design in the VHF and UHF Bands: A Practical Approach*. vyd. West Sussex: Wiley, 2006. ISBN 978-0-470-02980-0.
- [2] PECHAČ, Pavel a Stanislav ZVÁNOVEC. *Základy šíření vln pro plánování pozemních rádiových spojů*. Praha: BEN-Technická literatura, 2007. ISBN 978-80-7300-2.
- [3] SIZUN, Hervé. *Radio wave propagation for telecommunication applications*. vyd. Berlin: springer, 2005. ISBN 35-404-0758-8.
- [4] Recommendation ITU-R P.526-13. *Propagation by diffraction*. 11/2013. ITU, Geneva. Dostupné z: http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.526-13-201311-I!!PDF-E.pdf
- [5] Recommendation ITU-R P.370-7. *VHF and UHF propagation curves for the frequency range from 30 MHz to 1 000 MHz*. 10/1995. ITU, Geneva. Dostupné z: http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.370-7-199510-W!!PDF-E.pdf
- [6] Recommendation ITU-R P.1546-5. *Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3 000 MHz*. 09/2013. ITU, Geneva. Dostupné z: http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1546-5-201309-I!!PDF-E.pdf
- [7] GÖTZ, Roland. *Supporting Network Planning Tools II* [online]. Dostupné z: https://www.itu.int/ITU-D/tech/OLD_TND_WEBSITE/network-infrastructure_OLD/Nairobi-02/5-7_LStelcom.pdf
- [8] SEYBOLD, John S. *Introduction to RF propagation*. Hoboken, N.J.: Wiley, 2005, xv, 330 s. ISBN 04-716-5596-1.
- [9] *Shutterstock: Fotografie, snímky pro členy zdarma a vektory* [online]. 2003 [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: www.shutterstock.com/cs/
- [10] Elektromagnetické spektrum. *Wikipedia: Otevřená encyklopedie* [online]. 2005 [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetick%C3%A9_spektrum
- [11] WLAN antennas. *Fresnel Zone* [online]. [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: http://www.wlanantennas.com/fresnel_zone.php
- [12] KUGUŠEV, A. M. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*. Praha: Jednota českých matematiků a fyziků, 1956. ISBN 0032-2423.

- [13] CRC Data. *RadioLab 4* [online]. 2013 [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://www.crcdata.cz/index.php/radiokomunikacni-sw/rada-rl4/radiolab-4>
- [14] Mapa Vysílačů. *Mapa Vysílačů: Interaktivní mapa DVB-T* [online]. 2009 [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://www.mapavysilacu.cz/>
- [15] České Radiokomunikace: *Televizní vysílání* [online]. 2015 [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://www.radiokomunikace.cz/tv-a-rozhlasove-vysilani.html>
- [16] Předpis č. 163/2008 Sb.: Vyhláška o způsobu stanovení pokrytí signálem zemského televizního vysílání. *Zákony pro lidi* [online]. 2008 [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://www.zakonyprolidi.cz/cs/2008-163>
- [17] GHASEMI, Abdollah, Farshid GHASEMI a Ali ABEDI. *Propagation engineering in radio links design*. Springer, 2013, 549 str. ISBN 978-146-1453-130.
- [18] Mapy. *Mapy.cz: Seznam.cz* [online]. 2015 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: <http://www.mapy.cz/>
- [19] Rádiové vlny. In: *EProjekt* [online]. 2011 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: www.eprojekt.gjs.cz/Services/Downloader.ashx?id=2414

Seznam příloh

Příloha A:	Obrázková příloha	I
Příloha B:	Nastavené parametry	VII

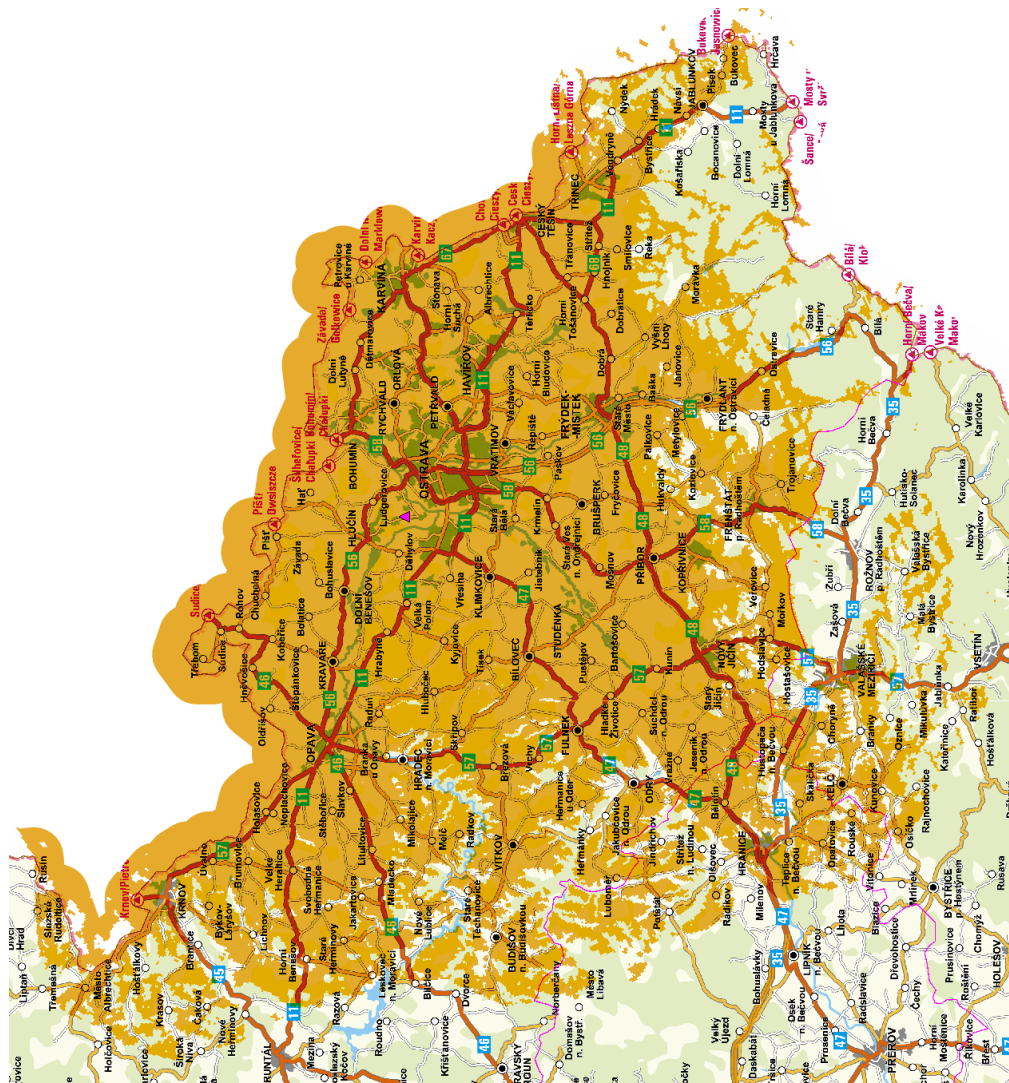
Součástí BP/DP je CD/DVD.

Adresářová struktura přiloženého CD/DVD:

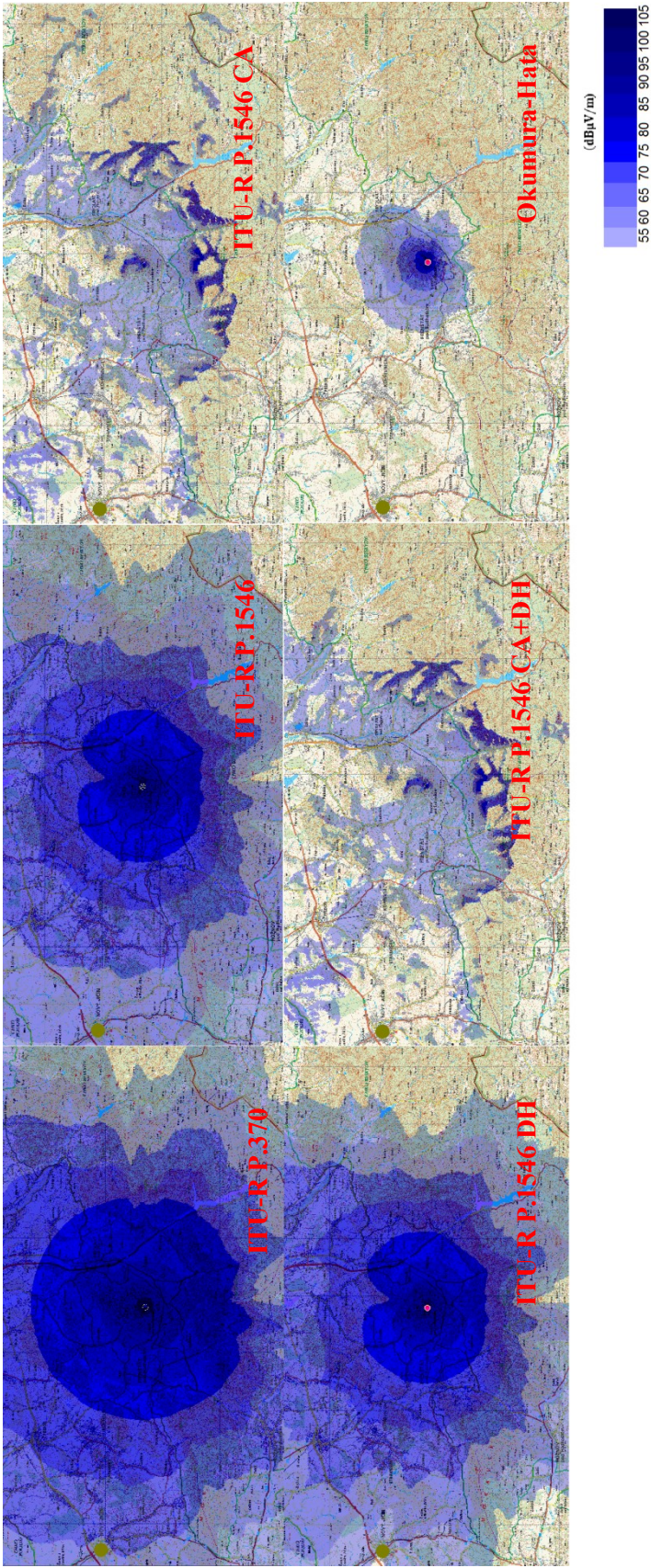
Mapa pokrytí – adresář obsahující veškeré vygenerované mapy pokrytí, dále se dělí na podadresáře s názvy oblastí. Syntaxe názvu obrázku je tvořena následující posloupností: název vysílače _ zkoumaná oblast _ použitý model.

Patenty – adresář obsahující použité patenty ITU.

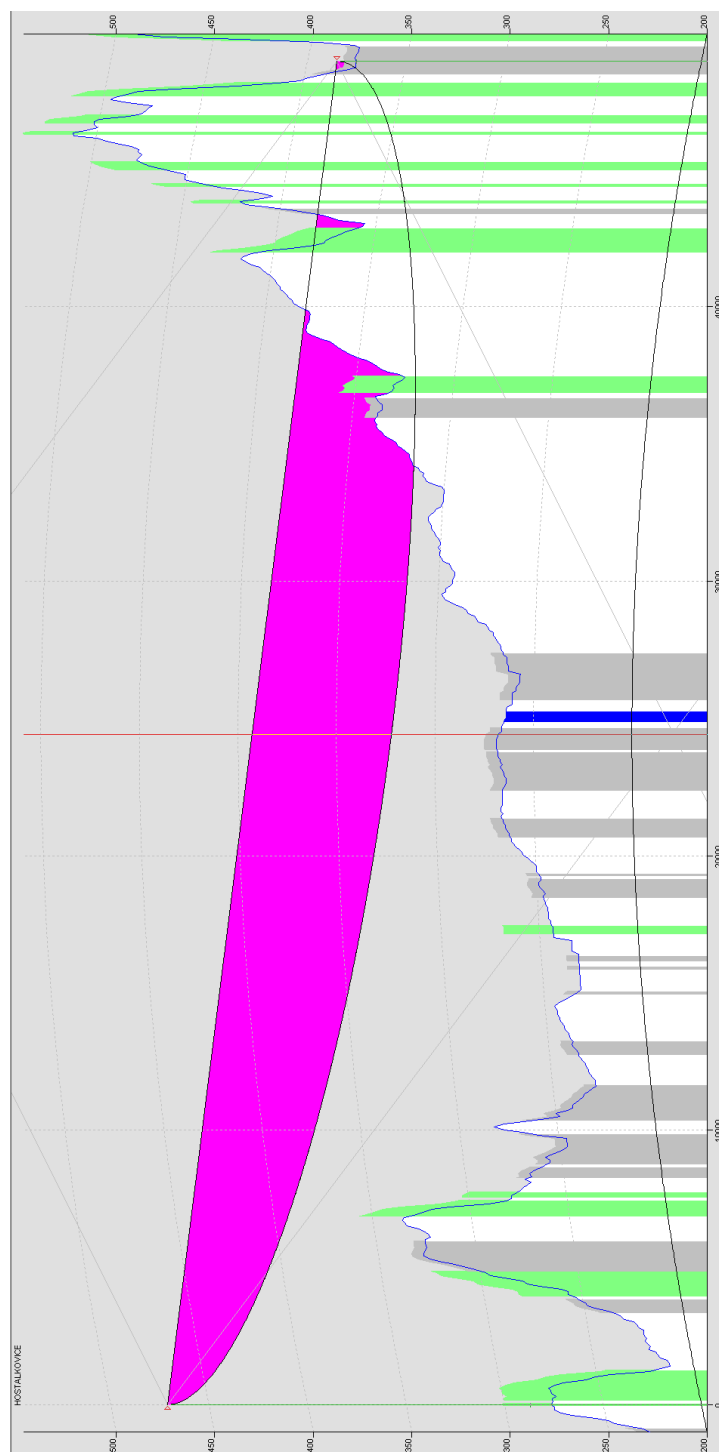
Příloha A: Obrázková příloha



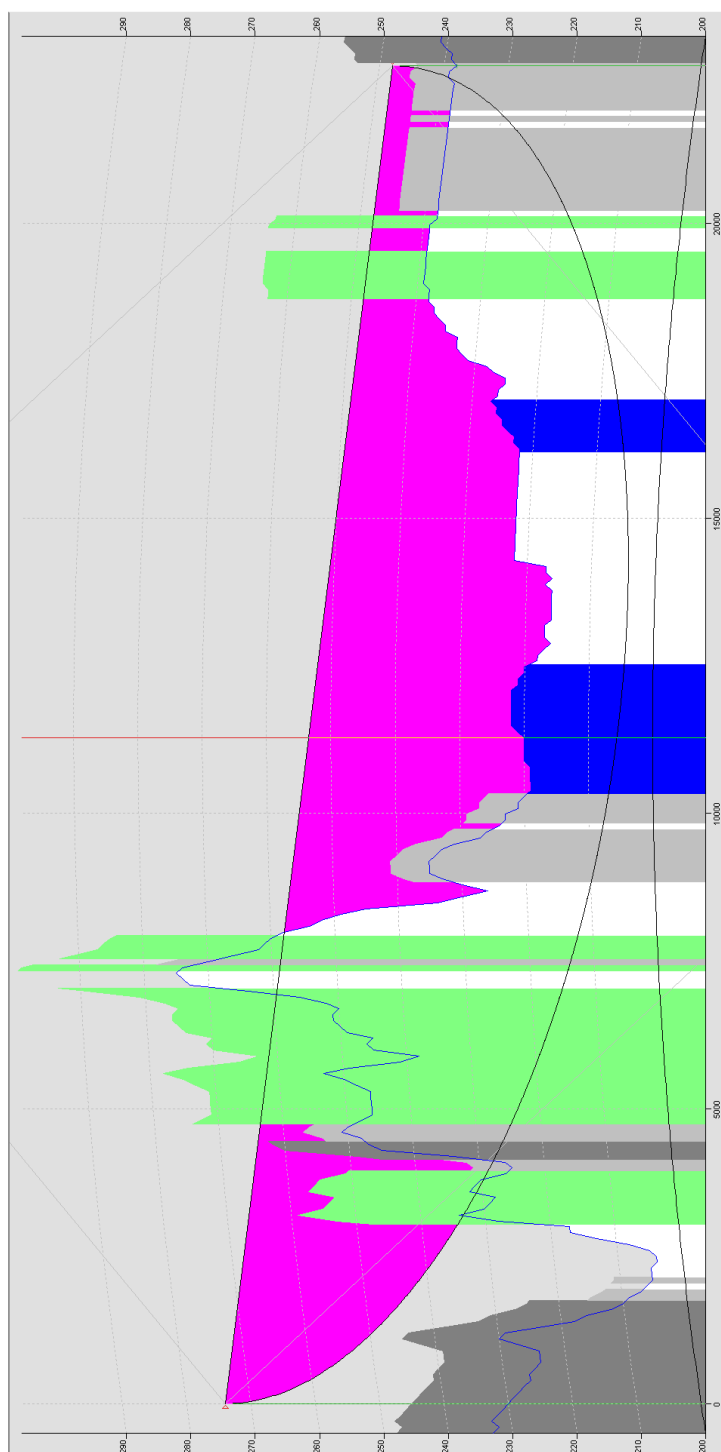
Obrázek A.1: Mapa pokrytí Multiplexu č.1 – Ostrava – Hošťálkovice [15]



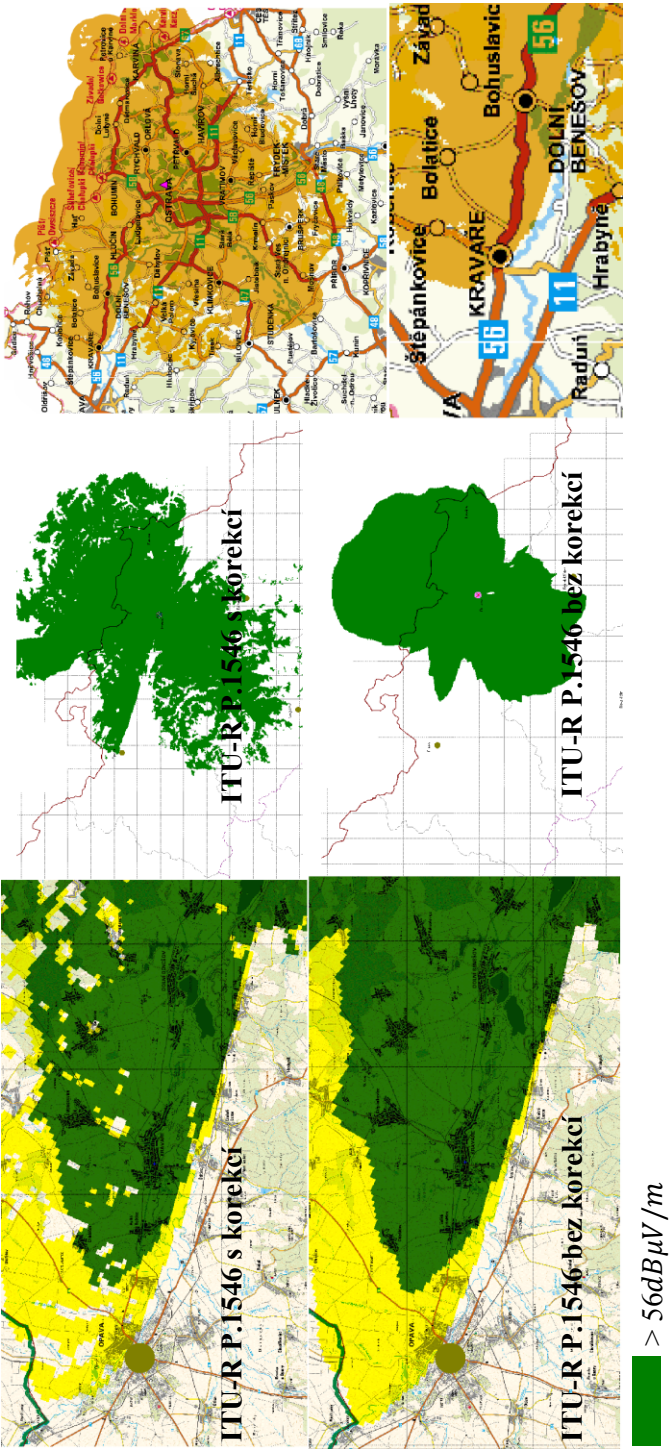
Obrázek A.2: Ilustrace vykreslených map pokrytí pro simulaci v horském prostředí.



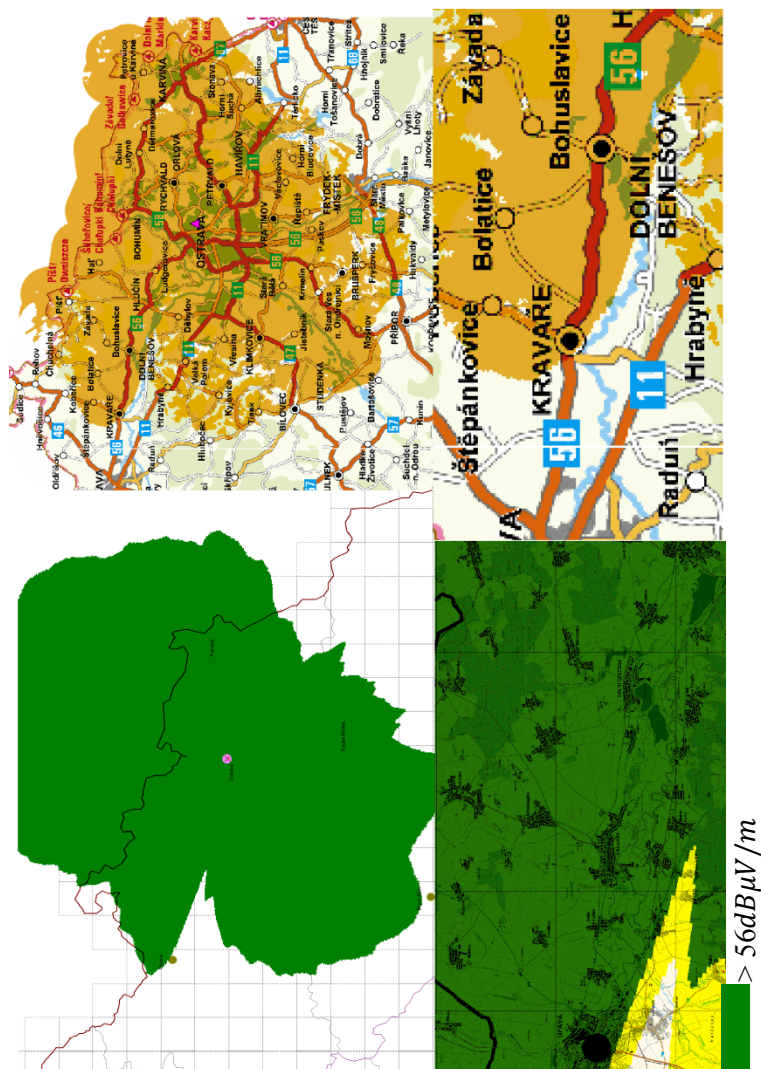
Obrázek A.3: *Narušení Fresnellovy zóny na trase Ostrava – obec Zátor*



Obrázek A.4: Narušení Fresnelovy zóny na trase Ostrava – Kravaře



Obrázek A.5: Porovnání modelu ITU-R P.1546 s korekcí a bez korekcí a zároven s referenčními hodnotami



Obrázek A.5: Porovnání modelu Okumura-Hata s referenčními hodnotami[15]

Příloha B: *Nastavené parametry*

Příloha B.1 - *Technické parametry vysílače Hošťálkovice*

Pro simulace pokrytí byl využit DVB-T Multiplex 1 – tzv. veřejnosprávní multiplex. Jeho parametry pro vysílači Hošťálkovice jsou[15]:

- efektivní vyzářený výkon: 100 kW (50 dBW)
- kmitočtová pozice: 54. Kanál (738 MHz)
- šířka pásma: 8 MHz
- konstelace: 64 QAM
- pata stožáru: 287 m
- výška antény: 184 m
- polarizace: horizontální
- typ vysílače: základní vysílač
- minimální intenzita pro příjem signálu: 56 dB μ V/m
- provozovatel vysílače: ČRa

Příloha B.2 - *Technické parametry vysílače Ostrava – Hladnov (Slezská Ostrava)*

Pro simulace pokrytí byl využit DVB-T Multiplex 1 – tzv. veřejnosprávní multiplex. Jeho parametry pro vysílač Ostrava - Hladnov jsou[15]:

- efektivní vyzářený výkon: 10 kW (40 dBW)
- kmitočtová pozice: 54. Kanál (738 MHz)
- šířka pásma: 8 MHz
- konstelace: 64 QAM
- pata stožáru: 265 m
- výška antény: 44 m
- polarizace: horizontální
- typ vysílače: základní vysílač
- minimální intenzita pro příjem signálu: 56 dB μ V/m
- provozovatel vysílače: ČRa